



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Sede Amministrativa: Università degli Studi di Padova

Dipartimento dei Beni Culturali: Archeologia, Storia dell'Arte, del Cinema e della Musica

CORSO DI DOTTORATO DI RICERCA IN: Storia, Critica e Conservazione dei Beni Culturali
CICLO: XXXIV

Archeologia predittiva e simulativa.
Un approccio analitico e applicativo a *predictive* e *agent-based modelling*

Coordinatore: Ch.ma Prof. Federica Toniolo

Supervisore: Ch.mo Prof. Armando de Guio

Dottorando : Laura Burigana

Abstract

Il presente progetto è focalizzato sull'impiego di una modellistica di tipo agenziale (*Agent-Based-Modeling* o AMB) applicata all'indagine dell'area centrale della cosiddetta *polity* terramaricola nordpadana. Il lavoro, che s'inserisce nell'ambito di ricerca del progetto AMPBV, è stato indirizzato all'investigazione, attraverso un approccio simulativo, delle modalità e dei principali fattori che possono aver portato le comunità protostoriche della Bassa Pianura Veronese, tra la fine del Bronzo Recente e gli inizi del Bronzo Finale, da un momento climax di massima espansione ed articolazione (socio-politica, economica e territoriale) ad un repentino collasso. Lo studio del caso ha portato alla formulazione di molteplici ipotesi, che a seconda dell'approccio hanno ricondotto, in misura differente, a processi di natura sia antropica che ambientale, e che è nell'idea di questo progetto esplorare. Con l'obiettivo di sperimentare l'*Agent-Based Modeling* (che negli ultimi anni ha trovato spazio, a livello internazionale, anche in ambito archeologico) nell'analisi di fenomeni complessi del passato, si sono quindi intrapresi sia uno studio della metodologia a livello teorico, sia la scrittura preliminare di un codice informatico applicabile al caso di studio, che ha previsto un'attività pregressa di documentazione relativa al contesto e l'apprendimento di un linguaggio di programmazione dedicato (NetLogo). Il risultato è un modello agenziale ad alto livello di complessità, in cui è esplorato in particolar modo il rapporto tra insediamenti, risorse territoriali e clima, ma aperto ad ulteriori possibili idee di sviluppo. L'auspicio con la presente ricerca è, da un lato, di aprire il caso di studio a nuove possibilità di analisi e, dall'altro, contribuire in qualche modo e far conoscere meglio questo l'ABM, portando a maggiori riflessioni sulle sue potenzialità.

Indice

1. Introduzione	4
1.1. Introduzione generale del caso di studio e della metodologia di ricerca.....	4
1.2. Inquadramento geografico e cronologico del contesto d'indagine.....	5
1.3. Struttura e articolazione della tesi	6
2. Presentazione del contesto di indagine.....	8
2.1. Indagini e scoperte nella pianura veronese dal 1800 ad oggi.....	8
2.1.1. Le ricerche del progetto AMPBV.....	11
2.2. Il territorio	17
2.2.1. Inquadramento geomorfologico generale.....	17
2.2.2. Il paesaggio delle valli grandi: una storia di relazioni tra uomo e ambiente	20
2.3. Protostoria della bassa Veronese e del territorio Veneto attraverso la lettura dei dati archeologici	22
2.4. Lo sfruttamento e la gestione delle risorse	31
2.5. Le strade, i fiumi, il mare: la mobilità nella Bassa Veronese nell'età del Bronzo	39
2.5.1. Gestione agricola e connettività. Un esempio di infrastrutturazione "ibrida" nella Bassa Veronese: il costruito SAM.....	41
2.6. Analisi di un collasso	47
2.6.1. La parabola dei Pelasgi.....	58
3. Introduzione alla metodologia: l' <i>Agent-Based Modeling</i>	61
3.1. Modelli e scienze sociali: un percorso immersivo nello studio della complessità	61
3.2. Agenti, ambiente, regole: entità e funzionalità in un modello attoriale.....	66
3.2.1. Gli agenti	66
3.2.2. L'ambiente.....	67
3.2.3. Le regole.....	72
3.3. Netlogo	74
3.4. Comunicare un ABM: il protocollo ODD.....	78
3.4.1. <i>Overview</i> (panoramica)	79
3.4.2. <i>Design concept</i> (caratteristiche)	79
3.4.3. <i>Details</i> (dettagli).....	81
3.5. Un'analisi di collasso <i>agent-based</i> . Lo "strano" caso degli Anasazi nella Long House Valley	83
4. AMPBV SIMULATOR. Un <i>Agent-Based Model</i> per la Bassa Veronese.....	89
4.1. Dalla Long House Valley alla Bassa Veronese	89

4.2. Overview	91
4.2.1. Obiettivi.....	91
4.2.2. Entità, variabili di stato e risoluzione	94
4.3. Design concepts.....	104
4.3.1. Principi di base	104
4.3.2. Emergenza	105
4.3.3. Adattamento	106
4.3.4. Idoneità.....	107
4.3.5. Apprendimento e predittività.....	108
4.3.6. Interazione.....	109
4.3.7. Stocasticità.....	110
4.3.8. Osservazione	112
4.3.9. Interfaccia di controllo	112
4.4. Dettagli	115
4.4.1. Inizializzazione.....	115
4.4.2. Dati e fonti di riferimento.....	125
4.5. Descrizione dei processi principali.....	139
4.5.1. Produzione.....	139
4.5.2. Scambi	157
4.5.3. Consumo.....	174
4.5.4. Aggiornamento demografico.....	176
4.5.5. Aggiornamento dei siti	187
6. Calibrazione e <i>testing</i> preliminare.....	192
6.1. Una prima sperimentazione di AMPBV SIMULATOR	195
7. Conclusioni.....	199
7.1. Considerazioni e idee di sviluppo per il modello	199
7.2. Catastrofe, rivoluzione, evoluzione? Riflettendo sull'archeologia della complessità.....	203
Bibliografia.....	206
Appendice A: Codice completo	I
Appendice B: Schede sito.....	XCVII

1. Introduzione

1.1. Introduzione generale del caso di studio e della metodologia di ricerca

Obiettivo del presente progetto di dottorato è la produzione di una modellistica di tipo agenziale (*Agent-Based-Modeling* o AMB) applicata all'indagine dell'area centrale della cosiddetta *polity* terramaricola nordpadana. Il lavoro è stato indirizzato all'investigazione, attraverso un approccio simulativo, delle modalità e dei principali fattori che verosimilmente condussero le comunità protostoriche insediate nell'area della Bassa Pianura Veronese, tra la fine del Bronzo Recente e gli inizi del Bronzo Finale, da un momento climax di massima espansione ed articolazione (socio-politica, economica e territoriale) ad un repentino collasso. Di questo sistema antropico complesso, fortemente organizzato e gerarchizzato, costituivano i poli egemoni insediamenti arginati "di primo rango", più estesi e strutturati, tra cui spiccano per la loro rilevanza Fabbrica dei Soci, Lovara e soprattutto Castello del Tartaro e Fondo Paviani. Il caso della Bassa Veronese fa parte del più ampio scenario di crisi che coinvolse l'intera civiltà terramaricola sia a sud (prima) che a nord (poi) del Po, e che la portò alla totale obliterazione lasciando spazio a nuovi assetti geopolitici che ne raccolsero il ruolo centrale all'interno dei flussi di scambio ad ampio raggio. Lo studio del caso, che trova confronto con altri contesti (di cui molti trovano collocazione cronologica nel medesimo periodo a cui, non a caso, si fa notoriamente riferimento come "crisi del XII secolo" o "collasso dell'età del Bronzo") ha portato alla formulazione di molteplici ipotesi, che a seconda dell'approccio hanno ricondotto, in misura differente, a processi di natura sia antropica che ambientale, e che è nell'idea di questo progetto tentare, almeno in parte, di esplorare in un'ottica simulativa multi-attoriale.

Al di là dell'interesse per lo specifico contesto, il quale costituisce da oltre quarant'anni oggetto di studio del gruppo AMPBV (specializzatosi in interventi a minimo impatto e nell'impiego di tecnologie d'indagine e rilievo innovative), lo scopo della ricerca è quello di sperimentare l'*Agent-Based Modeling* come metodologia di analisi di fenomeni complessi del passato. Si tratta una forma di modelli computazionali in cui i processi vengono generati a partire da unità individuali (gli "agenti") e le loro interazioni (Wilensky, Rand 2015, p.1). A partire dalla definizione dei singoli attori, delle loro caratteristiche e delle loro attitudini e norme comportamentali, si tenta quindi di dar luogo e descrivere l'emergenza di processi collettivi e fenomeni su larga scala. Negli ultimi anni l'ABM ha trovato spazio in diversi settori di ricerca

e, a livello per lo più internazionale, anche in ambito archeologico per via delle sue spiccate potenzialità applicative nelle scienze storiche e sociali. che richiedono un approccio di studio rivolto alla comprensione di sistemi complessi. Si tratta, tuttavia, di un metodo ancora poco esplorato e conosciuto, la cui comprensione e comunicazione non sono sempre immediate. Lo scopo del presente lavoro, per tali ragioni, non è solo quello di creare un modello di analisi per il contesto d'indagine, ma anche quello di ponderare, sia attraverso lo studio che con l'esperienza diretta, le implicazioni pratiche ed epistemologiche della metodologia applicata.

1.2. Inquadramento geografico e cronologico del contesto d'indagine

Il comparto territoriale considerato per la presente ricerca corrisponde, grossomodo, al comparto settentrionale dell'areale di indagine del progetto AMPBV (Alto-Medio Polesine Basso Veronese), ovvero al settore meridionale delle Valli Grandi Veronesi o bassa (e in parte media) pianura veronese. Da un punto di vista amministrativo, l'area rientra per lo più all'interno della provincia di Verona e in minima parte in quelle di Rovigo, Padova e Mantova, e in essa rientrano (totalmente o parzialmente) i comuni di Gazzo Veronese (VR), Cerea (VR), Legnago (VR), Villabartolomea (VR), Merlara (PD), Castelnovo Bariano (RO) e Ostiglia (MN). Sotto l'aspetto fisiografico, invece, l'area di studio è approssimativamente inclusa tra il limite tra media e bassa pianura (a nord), l'attuale percorso del Tartaro-Canal Bianco (a sud) e il corso del fiume Adige (ad est-nordest). L'ambito qui descritto, esplorato nel corso di quasi quarant'anni dal gruppo di lavoro AMPBV (cfr *infra*), consiste, dal punto di vista storico, a quello che è stato il "cuore" del più esteso comparto terramaricolo nordpadano, a cui appartenevano siti di ragguardevole estensione come gli insediamenti arginati di Castello del Tartaro (Cerea), Fabbrica dei Soci (Villabartolomea), Fondo Paviani (Legnago) e Lovara (Villabartolomea).

All'interno dell'area così definita è stato preso in considerazione il campione di siti datato alla fase di massima espansione e articolazione della *polity* terramaricola nordpadana, individuata nel periodo del Bronzo Recente 2 (BR2). La cronologia di riferimento per questo lavoro (secondo cui sono state rilevate le datazioni dei siti coinvolti nell'indagine¹) è quella che è stata sinora più frequentemente seguita nell'ambito del progetto AMPBV, ovvero quella definita da Bernabò Brea e Cardarelli (1997) e riaggiornata da quest'ultimo nel 2010 (Cardarelli 2010)

¹ La cronologia dei siti considerati nella presente analisi è stata aggiornata secondo Dalla Longa (2015).

- Bronzo Antico (BA), suddiviso in Bronzo Antico 1 (BA1, a partire dalla metà del XXI sec a.C. fino alla fine del XIX sec. a.C.) e Bronzo Antico 2 (BA2, dalla fine del XIX sec. a.C. alla metà del XVII sec. a.C.)

- Bronzo Medio (BM), distinto in una fase iniziale detta Bronzo Medio 1 (BM1, dalla metà del XVII sec. alla metà del XVI sec. a.C.), una fase centrale di Bronzo Medio 2 (BM2, dalla metà del XVI alla metà del XV sec. a.C.), e una fase più evoluta (Bronzo Medio 3 o BM3, tra la metà del XV e la seconda metà del XIV sec. a.C.)

- Bronzo Recente (BR, dalla seconda metà del XIV sec alla metà del XII a.C.), entro cui sono state individuate una prima fase di Bronzo Recente 1 (BR1) e una successiva di Bronzo Recente 2 (BR2)

- Bronzo Finale (BF, dalla metà del XII sec. a.C. all’VIII sec a.C.)

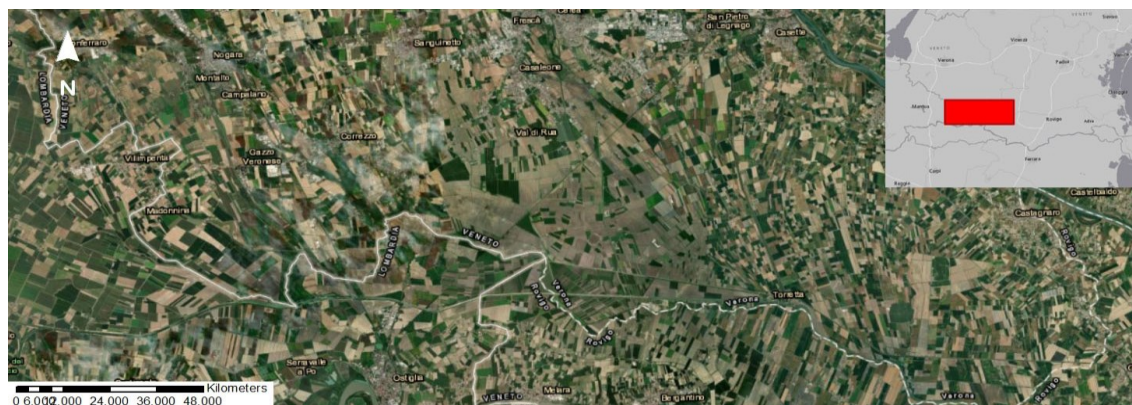


Fig. 1. Veduta aerea dell'areale di ricerca.

1.3. Struttura e articolazione della tesi

A seguito della presente introduzione viene trattata la storia degli studi (cap. 2), a partire da una panoramica generale delle scoperte nelle Valli Grandi Veronesi per procedere con un *focus* sul lavoro di ricerca nell'areale del gruppo AMPBV, dalle prime indagini negli anni '80 fino alle ultime attività svolte durante le più recenti campagne sul campo. Nel capitolo successivo (cap. 3) viene presentato e descritto il contesto di studio, con attenzione rivolta agli aspetti ritenuti più caratterizzanti e critici per la presente ricerca ovvero un inquadramento dal punto di vista fisiografico e geomorfologico, le dinamiche di popolamento nell'arco cronologico dell'età del Bronzo (con particolare attenzione per la fase pertinente allo sviluppo della civiltà terramaricola e al suo declino), la gestione e lo sfruttamento delle risorse e le dinamiche di mobilità e flussi di scambio, concludendo con un excursus generale sull'analisi

dei fenomeni di collasso dei sistemi antropici nella storia (e, in particolare, nella protostoria del comparto terramaricolo nordpadano). La successiva parte della tesi (cap.4) è dedicata all'*Agent-Based Modeling* come metodologia a partire dal suo sviluppo in campo scientifico, definendolo nei suoi caratteri e componenti costitutive fondamentali e descrivendo le principali funzionalità del software NetLogo impiegato nella presente ricerca; viene anche brevemente presentato il protocollo utilizzato per l'esposizione del modello creato (protocollo ODD, cfr. Grimm et al. 2006). La sezione è conclusa da una descrizione, in quanto caso-pilota dell'applicazione di questo metodo in archeologia, del lavoro di Axtell et al. (2002) sul collasso della civiltà degli Anasazi (VII-IX sec) in nord America. Si procede quindi, nel capitolo successivo (cap. 5), alla descrizione del modello secondo il suddetto protocollo che, dopo una panoramica generale degli obiettivi, del processo generale e delle sue entità, prevede un'esposizione discorsiva delle sue caratteristiche e una definizione in dettaglio dei macroprocessi principali. Il cap. 6 è dedicato ad un testing preliminare del modello, di cui sono esposte potenzialità e criticità. Nell'ultima parte dell'elaborato (cap. 7) sono infine esposte conclusioni e considerazioni sul lavoro svolto.

2. Presentazione del contesto di indagine

2.1. Indagini e scoperte nella pianura veronese dal 1800 ad oggi

Un primo periodo di studi preistorici nel territorio della pianura veronese risale agli anni '60 del diciannovesimo secolo, a cui presero parte Pietro Paolo Martinati, Stefano De Stefani, Francesco Masè, Gaetano Pellegrini e alte personalità associate all'*Accademia di Agricoltura, Scienze e Lettere di Verona* e al *Museo Civico di Storia Naturale di Verona*. Nel 1856 fu inaugurata, sotto la curatela di Martinati, la *Esposizione Preistorica Veronese* presso il museo Civico di Storia Naturale di Verona (Martinati 1876; Goiran 1876; Omboni 1876; Pigorini 1876), in cui vennero esposti anche materiali archeologici provenienti dalla bassa pianura, raccolti in seguito a segnalazioni private e, soprattutto, durante attività estrattive in torbiera. Molti dei recuperi vennero effettuati grazie alla rete di conoscenze dello stesso Martinati, più attiva nella zona occidentale della provincia: nella carta topografica prodotta nel 1876 (Martinati, 1876), in cui si indicava la locazione dei rinvenimenti archeologici noti, l'area della Bassa Veronese risultava ancora una *terra incognita*. Furono De Stefani e Castelfranco, su invito di Pigorini, ad effettuare le prime indagini in loco con l'obiettivo di dimostrare come anche in territorio veneto fossero presenti gli antichi abitati terramaricoli, tipicamente dotati di argine e fossato perimetrale. Risalgono a quegli anni la scoperta delle necropoli di Bovolone e di Gambaloni di Povegliano (Facchi 2005, pp.126-129). Durante periodo successivo, che va dagli ultimi anni del diciannovesimo al primo quarto del ventesimo secolo, le attività di studio ebbero una fase pressochè di stasi, dovuta probabilmente ad una concomitanza di fattori sfavorevoli come la morte di Pigorini e, in generale, lo "spegnersi" della generazione di studiosi che aveva curato le prime ricerche (Salzani 1987, p.29), l'avvio della fase della reazione idealista, e lo scoppio della Prima Guerra Mondiale. Il periodo immediatamente successivo vide l'attività di alcuni nomi importanti per la storia degli studi preistorici nelle Valli Grandi Veronesi. Alessio De Bon, fondatore della *Società Archeologica Legnaghese*, finanziò e intraprese diverse attività d'indagine, focalizzando tuttavia il proprio interesse in particolar modo sull'antica viabilità romana. E' a lui, tuttavia, che si deve l'importante scoperta di una delle principali "stazioni" terramaricole del comparto nordpadano, il sito arginato di Castello del Tartaro (De Bon 1941, pp. 184-187), che inserì nella Carta Archeologica d'Italia nel 1929 e nella Carta delle stazioni preistoriche del Basso Veronese (Fiori 2000, pp. 98-99). All'attività di ricerca del De Bon fece seguito quella

di Francesco Zorzi, direttore del *Museo Civico di Verona* a partire dal 1945, il quale collaborò frequentemente con Maria Fioroni, a cui è intitolata la Fondazione Fioroni di Legnago (Ferrarese 2008, pp. 85-86). A quest'epoca risalgono le prime indagini dei siti in località Massaua (Zorzi 1955a, p.157), Fabbrica dei Soci nel 1932 (Zorzi 1955a, pp. 168; Fioroni 1967-68, p. 148; Balista, De Guio 1990-91), Morandine di Cerea nel 1939 (Zorzi 1955b), Tombola di Cerea nel 1955 (Durante, Pasa 1969, p. 149), Mulino Giarella, Cop Roman (Salzani 1987a, p. 31) Finilone, oltre che le necropoli della Colombara (Pasa, Fasani 1964-66, p. 218). e di Olmo di Nogara nel 1936 (Salzani 1987a, p. 29). Agli inizi degli anni '70 la Sezione di Preistoria del Museo Civico di Verona effettuò una serie di verifiche sul campo delle sempre più frequenti segnalazioni giunte alla Soprintendenza negli ultimi anni. Nel 1978 veniva istituito a Verona il Nucleo Operativo, anch'esso coinvolto nelle indagini, che portarono alla documentazione di diversi siti in aree agricole oltre che alla scoperta e alle prime ricerche nelle necropoli di Franzine Nuove a Villabartolomea (Aspes, Fasani 1968). e Ponte Nuovo a Gazzo Veronese (Salzani 2001, p. 75). Vennero alla luce in quegli anni anche gli abitati del Mulino, Perteghelle (Aspes, Salvatori 1972), Corte Vivaro (Fasani 1977), Fondo Paviani (Fasani, Salzani 1975), Terranegra (Rizzetto, Salzani 1975). Stangheletti (Belluzzo, 1980) e Macaccari-quartieri nord (Salzani 1982). Le ricerche proseguirono anche nel corso degli anni '80, anche grazie alla collaborazione di gruppi locali di appassionati. Al 1980 risale la scoperta fortuita dell'abitato di Coron di Macaccari, mentre grazie alle indagini di superficie alla fine del decennio venne localizzata la necropoli di Scalvinetto di Legnago. In questi anni, oltre ad un intensificarsi delle attività di ricognizione, cominciava a nascere un interesse per il telerilevamento e lo studio delle tracce territoriali da foto aerea. A queste nuove strategie di ricerca sono legate, contestualmente, le prime collaborazioni con le università, in particolare il Dipartimento di Scienze dell'Antichità dell'Università di Pavia (Tozzi, Harari, 1990) e, soprattutto, il Dipartimento di Archeologia dell'Università di Padova: in quegli anni, infatti, veniva avviato il progetto AMPBV (Alto Medio Polesine-Basso Veronese) (De Guio, Whitehouse, Wilkins 1989) in collaborazione con le università di Lancaster e Londra e, successivamente, l'Università di Roma (cfr *infra*). I primi interventi di indagine archeologica preventiva negli anni '90 hanno portato alla localizzazione di nuovi importanti contesti, come il deposito votivo di Pila del Brancòn (Salzani 1993), i siti de I Camponi di Nogarole Rocca (Salzani, Chelidonio 1992), Bovolone (Belluzzo, Salzani 1998, pp. 12-13), Dossetto di Nogara (Salzani 1997), Macaccari-quartieri sud o Castel di Macaccari

(Salzani 1993), Perteghelle 1 e la necropoli di Valserà di Gazzo Veronese. Durante le attività di ricerca dirette da Tirabassi (1997) è stata inoltre individuato l'insediamento terramaricolo di Lovara a Villabartolomea (Salzani 1998-99). Da un'iniziativa del Consorzio di Bonifica Valli Grandi e Medio Veronese e dei comuni di Legnago e Cerea è stato inaugurato, alla fine degli anni '90 il Centro Ambientale Archeologico-Museo Civico come organo di ricerca, tutela, valorizzazione del paesaggio della Bassa Veronese e del suo patrimonio archeologico. La maggior parte delle nuove scoperte in questi anni e nei successivi è dovuta prevalentemente ad interventi preventivi e ritrovamenti in occasione di lavori per opere pubbliche e private. Tra questi, di particolare rilevanza sono il sito di Oppeano (ex fornace) nel 2000 (Saracino, Sboarina 2010, p. 38), il sito di Veronella nel 2003 (Salzani 2007), il sito di Corte Ansion nel 2007 (Salzani 2009), l'insediamento di Corte Vivaro (2005, inizialmente individuato tramite teleosservazione, cfr Tirabassi 2009, pp. 48-49.) e il sito de Le Vallette di Cerea (Fortunati, Pollo 2010, p. 24.), scoperto nel 2008 in occasione dei lavori di sistemazione per l'omonimo parco naturalistico. Oltre al proseguimento della ricerca del gruppo AMPBV, negli anni 2000 venivano avviati, in ambito universitario, due progetti di indagine e ricerca focalizzati rispettivamente sull'areale del sito di Oppeano (Università degli Studi di Verona) e sul sito di Fondo Paviani (Università di Padova, sotto la direzione del prof. Leonardi e del prof. Cupitò (cfr. Leonardi, Cupitò 2008, 2009; Cupitò 2010; Cupitò et al. 2014; Deiana et al.2020; Dalla Longa 2015, p.75).



Fig. 2. Maria Fioroni sullo scavo in località Massaua di Villabartolomea, nel 1954 (Bonfanti 2015)

2.1.1. Le ricerche del progetto AMPBV

Il progetto AMPBV (Alto-Medio Polesine - Bassa Veronese), attivo sin dal 1982 (Balista et al. 1986) sotto la direzione del Dipartimento dei Beni Culturali dell'Università degli studi di Padova (Prof. Armando De Guio) e della University College di Londra², è focalizzato sull'indagine archeologica non invasiva e di superficie (cfr. De Guio 1985) dell'area pianiziarica nord-polesana e del territorio delle Grandi Valli Veronesi meridionali, con particolare interesse per le dinamiche antropiche di età protostorica di cui rimane traccia (sebbene, purtroppo, in stato di progressivo deterioramento) nell'attuale territorio agrario. Il contesto è stato ritenuto ottimale per effettuare indagini a zero (o quasi) impatto proprio per via della sua vocazione agricola (cfr. Cantele, 1991-92; Cantele et al., 1992). Tale uso del suolo ha avuto infatti un effetto ambivalente sulle conoscenze archeologiche dell'area: se è vero che l'azione meccanizzata dei moderni mezzi produttivi ha comportato e continua a comportare una progressiva e inesorabile erosione del record archeologico, è proprio per via dell'effetto delle arature che sono venuti alla luce non solo grandi quantità di materiali protostorici, ma anche una sorprendente quantità di tracce visibili da remoto che hanno svelato la presenza di un ricchissimo "paesaggio fossile" che testimonia il grado di complessità e avanzamento (sia tecnologico che, verosimilmente, socio-politico), in particolare, della *polity* terramaricola nordpadana (De Guio, Betto 2005; Balista et al. 2006). Già dalle prime campagne d'indagine le attività svolte dal gruppo AMPBV hanno quindi previsto survey sistematici a vari livelli di intensità: l'attenzione è stata inizialmente rivolta alla zona di S.Pietro Polesine e Villabartolomea, e soprattutto all'area di collegamento tra il sito di Fabbrica dei Soci e il Fondo Paviani a Legnago (De Guio et al. 1989), effettuando una ricognizione intensiva lungo un transetto di raccordo tra i due siti. Sono state operate anche prospezioni magnetometriche e aperte sezioni stratigrafiche in posizione critica per l'interpretazione funzionale dei due siti e dei rispettivi sistemi "intra-sito/argine/fossato/extra-sito" e, contestualmente, effettuate analisi geologiche e prelevati campioni di fosfati destinati al laboratorio (De Guio et al. 1989; Balista et al. 1990; De Guio et al. 1990, p.217). Un metodo non invasivo che ha trovato ampio utilizzo nell'ambito del progetto è lo studio di "finestre stratigrafiche esposte": approfittando della presenza di numerosi fossati e scoline

² Al progetto hanno preso parte, negli anni: Università di Roma-La Sapienza; University of Nottingham, Regno Unito; Boston University (Center for Remote Sensing), USA; Worcester University (Idrisi Lab-Mass, USA).

agrarie di facile accessibilità, dalle pareti sono state ricavate delle sezioni di controllo a ridosso delle pareti, con l'intento di produrre descrizioni preliminari dei profili stratigrafici, disporre di un confronto con i dati da teleosservazione e individuare eventualmente aree problematiche da destinare ad uno studio più approfondito (De Guio et al. 1992, p.175). Le attività di ricerca sono proseguite regolarmente per tutta la durata degli anni '90, estendendo l'area d'indagine, con la ricognizione a bassa e media intensità in un transetto localizzato a cavallo della strada romana che va da Torretta a Lovo e la sperimentazione di una specifica gamma di strategie di approccio al record funerario di superficie. Ai fini di una più puntuale definizione cronologica sono stati inoltre effettuati campionamenti per analisi radiocarboniche (a cura di R.Whitehouse), archeometriche (A.Vanzetti, S.Levi) e geo-archeologici (C.Balista). In questo periodo è andato inoltre delineandosi un riassetto dell'apparato teorico, volto alla definizione di un'"archeologia della complessità" focalizzata sugli aspetti caratterizzanti la parabola delle terramare della Bassa Veronese in un'ottica di collasso e post-collasso (De Guio et al. 1993, p. 170, De Guio 1995a). Un aspetto cruciale dell'organizzazione dell'antico complesso insediativo è emerso proprio grazie all'interesse della ricerca per aree decentrate rispetto ai nuclei principali, e riguarda i sistemi di produzione agricola. Delle prime tracce sono state individuate ad est di Torretta di Legnago in seguito a livellamenti agrari, portando alla luce tracce di antichi fossati agrari di cui è stata analizzata e pubblicata la sequenza di riempimento (Vanzetti 1994, p.120-121). A partire dalla metà degli anni '90 sono state avviate indagini sistematiche presso l'insediamento arginato di Castello del Tartaro, che ha comportato anche un esame approfondito delle tracce visibili da remoto previo elaborazione di supporti immagine innovativi come il *Digital Terrain Model* (De Guio et al. 1995c, De Guio 1995b; Balista et al. 2005). Grazie all'impegno del gruppo AMPBV nel territorio è andato così delineandosi un quadro sempre più nitido della moltitudine di paesaggi della Bassa Veronese, presentato (Balista, De Guio 1997; Balista et al. 1997) insieme alle sue evidenze più interessanti all'interno dell'"iconico" volume legato all'omonima mostra "*Le Terramare. La più antica civiltà padana*" (Bernabò Brea et al. 1997). Le successive campagne hanno visto privilegiare come contesto di studio proprio l'area di Castello del Tartaro, con attenzione non solo per le evidenze interne al perimetro insediativo (livello "intra-sito"), ma anche per l'articolazione dello spazio *near-site*, in cui si è individuato una zona non residenziale a destinazione verosimilmente produttiva (potenzialmente identificabile con un *corral*), e per quello più propriamente *off-site* nel quale si sviluppa un'ampia rete di

antiche canalizzazioni a scopo irriguo (o a scopo di drenaggio, cfr. *infra*) (De Guio et al. 1999). Nel corso degli anni più recenti le attività del gruppo AMPBV sono proseguite con prelievi a campione e analisi micromorfologiche per una miglior lettura dei processi formativi (Nicosia 2003-2004) e dell'apparato produttivo e connettivo (Balista et al. 2005; De Guio, Betto 2005; De Guio et al. 2006; De Guio 2009; Balista 2009; De Guio et al. 2011; Bovolato 2011-2012; Betto 2013), periodiche attività di *survey* e sondaggi mirati di monitoraggio dello stato di preservazione del record archeologico, ma soprattutto su sull'analisi del paesaggio mediante protocolli metodologici innovativi e non impattanti. In particolare, grazie al progressivo abbattimento dei costi sia degli strumenti di rilievo sia di supporti-immagine, sia dei software di elaborazione e gestione dati, la ricerca è stata portata avanti grazie all'acquisizione ed elaborazione di immagini multisensoriali (acquisizioni lidar, radar, multispettrali) da piattaforma aerea e satellitare (De Guio 2013; Burigana 2014-2015; Balista et al. 2016; Burigana, Magnini 2017).

Ultime attività

Ulteriori attività di osservazione da remoto, rilievo e ispezione sul campo sono state effettuate più recentemente tra il 2018 e il 2019, anche se lo svolgimento di ulteriori indagini che erano pianificate sono state purtroppo compromesse dall'emergenza pandemica di questi ultimi due anni. Un primo sopralluogo dell'area di studio è stato effettuato da remoto nel mese di ottobre 2018, sorvolando con un velivolo leggero (in partenza dall'aeroporto civile in località Vangadizza, VR) l'areale di studio in corrispondenza dei due siti centrali rispetto al sistema Bassa Veronese, Castello del Tartaro e Fondo Paviani. Si è scelto di effettuare il volo in un periodo particolarmente opportuno per l'osservazione di *cropmarks*, ovvero tracce archeologiche la cui presenza è rivelata da una crescita vegetale differenziata. Lo scopo dell'indagine era quello di verificare, ad un livello di risoluzione assai maggiore rispetto alle immagini satellitari disponibili, la presenza e lo stato di conservazione delle tracce insediative e in particolar modo le tracce relative all'antica rete idraulica che doveva tutelare la produzione locale. L'esplorazione è stata utile anche a stabilire una serie di aree campione da indagare sul campo, in base al loro rapporto spaziale con le tracce utili, sfruttando la presenza di finestre stratigrafiche esposte dall'infrastrutturazione agraria in età moderna e contemporanea.



Fig.3. Foto aerea pseudo-zenitale del sito di Castello del Tartaro (volo di settembre 2018), trattata mediante equalizzazione. L'acquisizione ad alta risoluzione ha permesso di scorgere, oltre alla traccia chiara dell'aggere perimetrale (indicato dalla freccia azzurra), anche le più evanescenti tracce del corral a sudest (freccia rossa) e soprattutto le tracce delle antiche canalizzazioni concentriche attorno al sito (freccie in giallo).

Alla fine di gennaio 2019 si è svolta una breve campagna di lavoro sul campo, in via preliminare, presso il sito di Castello del Tartaro (comune di Cerea, VR) (da ultimo: Balista et al. 2015), con la collaborazione di 8 studenti. La missione aveva lo scopo, innanzitutto, di valutare la praticabilità effettiva di un intervento in corrispondenza degli *spot* d'indagine individuati con la teleosservazione. In secondo luogo, s'intendeva predisporre l'intera area destinata all'ispezione a terra anche per future indagini sul campo, è stata infatti impostata una griglia topografica di riferimento per il rilievo e la georeferenziazione di tracce e materiali eventualmente rinvenuti. Imprescindibili fattori logistici hanno imposto di effettuare l'intervento in un periodo dell'anno decisamente sfavorevole: l'esplorazione all'interno di fossati e scoline è stata difficoltosa per via della presenza di acqua e ghiaccio, e le limitate ore di luce hanno imposto ritmi di lavoro meno serrati, anche per via di condizioni meteorologiche talora proibitive (pioggia e neve). Nonostante ciò, è stato possibile effettuare una pulizia e un rilievo speditivo in corrispondenza di alcuni punti critici d'intersezione sia

con il sistema perimetrale aggere-fossato che con il *corral* a sudest dell'insediamento. In particolare:

- È stata effettuata una pulizia e ispezione parziale a sudovest e sudest del perimetro del sito (intersezione con elemento “fossato 2” o F2) lungo la parete meridionale

- Sono stati indagati, tramite una pulizia mirata del fossato F3 sia lungo la parete meridionale che lungo quella settentrionale, i punti d'intersezione con il perimetro del *corral* sudorientale. Nel caso dell'intersezione più a nord la parete è risultata purtroppo eccessivamente bioturbata dalla presenza di un albero in prossimità e quindi esclusa dalla pianificazione di ulteriori approfondimenti; l'ispezione a sud è stata maggiormente fruttuosa, benché a causa della presenza di acqua non sia stato possibile una pulizia totale.

- Gran parte delle attività di indagine si è svolta in corrispondenza del cosiddetto “fossato 1” (F1), con orientamento nordest-sudovest, che attraversa l'area insediativa del sito di Castello del Tartaro nel comparto settentrionale. L'intervento presso F1 ha comportato una pulizia più estesa e sistematica nella porzione meridionale, per la quale è stato anche prodotto un fotopiano, e un controllo dell'intersezione settentrionale con l'aggere di perimetrazione.

- Sempre lungo il fossato si è compiuta anche una ricognizione a bassa intensità con la partecipazione di 4 operatori, ad un passo di 10 m entro due corsie di ampiezza 5 m, con lo scopo di valutare sia la concentrazione che lo stato di dispersione dei materiali in rapporto sia alle evidenze rilevabili in sezione che alle tracce individuate tramite *remote-sensing*.



Fig.4. Castello del Tartaro (gennaio 2019). Attività di pulizia parziale di una parete dei fossati ispezionati; proiezione in GIS dell'esito della ricognizione.



Fig. 5. Castello del Tartaro. Vista generale (sud-est) della sezione ripulita e documentata (ottobre 2019).



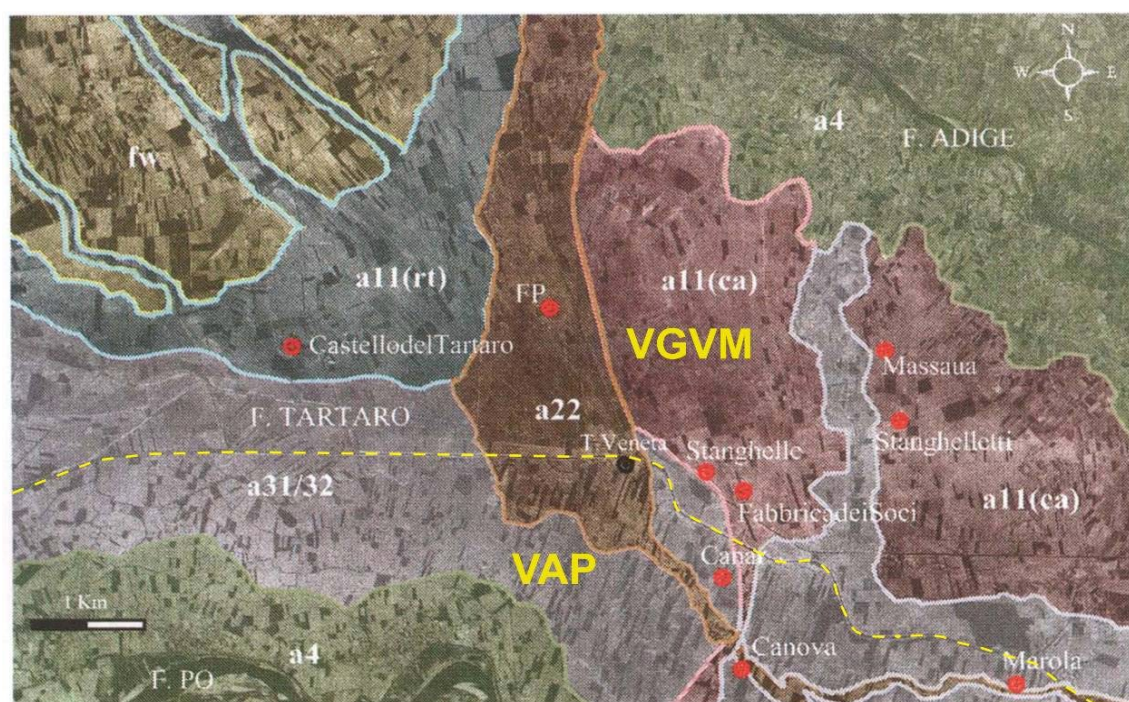
Fig.6. Dettaglio della sezione ispezionata, in cui si scorge il riempimento di uno dei fossatelli all'interno dell'areale insediativo.

2.2. Il territorio

2.2.1. Inquadramento geomorfologico generale

L'areale della Bassa Pianura Veronese, o Grandi Valli Veronesi Meridionali, si estende in latitudine per circa 10 km e in longitudine per circa 20 km. Il limite a nord dell'area è individuabile approssimativamente tra i centri abitati di Legnago e di Casaleone (a circa 35 km a sudest di Verona) mentre quello a sud coincide con il Canal Bianco (cfr. *infra*). Il limite sud-orientale corrisponde in parte ai confini regionali tra Veneto e Lombardia, mentre quello nord-occidentale è segnato dall'attuale tracciato del fiume Adige. Il territorio delle Valli Grandi Veronesi rappresenta, dal punto di vista geologico e geomorfologico, una fascia di raccordo tra i due principali sistemi fluviali del comparto (e i rispettivi depositi alluvionali): quello dell'Adige, che attualmente dalle Alpi si sviluppa in direzione nordovest-sudest e quello del Po, che scorre qualche chilometro più a sud dell'Adige in una direzione prevalente est-ovest. I confini dei due sistemi risultano non ben definiti per via degli episodi di reciproca ingressione di materiale (Piovan 2008; Piovan et al. 2010; Piovan et al. 2012): cicli ripetuti di esondazioni hanno regolato la sedimentazione di questi due fiumi tramite il deposito di materiale sia all'interno degli alvei che nella piana circostante (Corrò, Vinci 2021 p. 78). Pur costituendo una zona di bassa pianura, sono rilevabili nell'area diversi affioramenti superficiali attribuibili a porzioni oloceniche e pleistoceniche della pianura più antica formatasi con l'ultima avanzata glaciale (Last Glacial Maximum – LGM, 29.000-19.000 anni fa) (Castiglioni 2004; Fontana et al. 2004; Fontana et al. 2008). Se a nordovest si registra un alto morfologico determinato dagli apporti fluvio-glaciali, la zona planiziaria a sud e a est del conoide presenta depositi superficiali più recenti, contestuali alle divagazioni dell'Adige nel tardo-pleistocene/inizio-olocene. La stessa origine è attribuita al cosiddetto dosso di Stangheletti (dosso del Naviglio Bussé) e al cosiddetto dosso di Fabbrica dei Soci (dosso dello Scolo Cagliara) (Balista 1997, p. 137). Sono presenti nell'area anche corsi di orientamento opposto, alimentati dalle risorgive emergenti al contatto tra alta e bassa pianura. Tra essi il fiume Menago e il fiume Tregnone, che sorgono rispettivamente nei pressi di Buttapietra (VR) e Isola della Scala e sfociano nel Canal Bianco, e il fiume Bussé, che nasce nei pressi di Palù (VR) e che fino al XVIII secolo si immetteva nell'Adige presso Roverchiara. Il suo corso

è stato in seguito deviato entro il Naviglio Bussè per sfociare anch'esso nel Canal Bianco presso Torretta Veneta (VR). Il principale corso di risorgiva che attraversa l'area da ovest a est è il fiume Tartaro, che nasce nei pressi di Povegliano Veronese (VR) e si snoda naturalmente in direzione sudest lambendo Isola della Scala e Nogara, per fare ingresso nell'area di studio presso Gazzo Veronese. Il tratto successivo è stato regimentato entro il Canal Bianco, ricavato dall'escavo di un antico paleoalveo del Tartaro stesso³, che dopo circa 80 km in direzione est assume il nome di Fiume Po di Levante e sfociare dopo circa 16 km nel Mar Adriatico (Malesani 1952).



© ubicazione dei siti archeologici dell'età del Bronzo indagati nell'ambito del Progetto AMPBV

fw - depositi alluvionali terrazzati e pedogenizzati del "Conoide antico dell'Adige": PLEISTOCENE SUP.

a11(rt) - depositi alluvionali mediamente pedogenizzati delle conoidi a valle dei solchi dei fiumi di risorgiva: OLOCENE ANTICO

a11(ca) - depositi alluvionali mediamente pedogenizzati delle conoidi avulsive provenienti dal solco incastrato del f. Adige: OLOCENE ANTICO

a22 - depositi alluvionali debolmente pedogenizzati delle esondazioni incanalate del f. Adige: SUB-BOREALE (età del Bronzo Antica/Media)

a31/32 - depositi alluvionali non pedogenizzati delle esondazioni incanalate ed areali dei ff. Adige e Tanaro: SUB-ATLANTICO ANTICO (età del ferro)

a4 - depositi alluvionali non pedogenizzati delle esondazioni e delle cinte di divagazione dei ff. Adige e Po: SUB-ATLANTICO RECENTE (età post-romana)

Fig. 7. Illustrazione delle principali unità geomorfologiche e pedo-alluvionali nelle VGVM (Balista, De Guio 1997, p. 140).

³ Quasi parallelamente al Canal Bianco scorre la Fossa Maestra, anch'esso un canale artificiale risalente alla metà del XIX secolo. Minori affluenti del Canal Bianco sono lo Scolo Dugalone e lo Scolo Cagliari, alimentati dalle acque dell'Adige.



Fig.8 Mappa del bacino depresso delle Valli Grandi Veronesi in una carta topografica del 1876 (Leonardi e Rossi, 2004).

2.2.2. Il paesaggio delle valli grandi: una storia di relazioni tra uomo e ambiente

In concomitanza con i riassetti dei corpi idrici planiziari, periodiche trasformazioni del paesaggio ebbero senz'altro ripercussioni significative sulla presenza antropica nell'area. Il palinsesto del paesaggio fossile nelle Valli Grandi Veronesi deve quindi molto delle proprie caratteristiche a ripetuti episodi di riassetto sul piano idrogeologico. Una modalità piuttosto frequente con cui si sarebbero verificati tali fenomeni consiste in processi di confluenza o di diversione/biforcazione entro segmenti di paleoalvei preesistenti, con conseguenti accentuazioni o incisioni dei depositi sedimentari contribuendo così, unitamente alla già diffusa presenza di alvei sopraelevati, a disomogeneizzare progressivamente la superficie planiziaria. Questo facilitò ulteriormente il verificarsi di episodi avulsivi (parziali o totali) dei flussi paleo-fluviali, direzionandoli verso le aree maggiormente depresse. A condizionare le rotte di diversione fluviale verso la pianura centrale è il substrato geologico locale, soggetto ad una progressiva subsidenza (Balista 2018, 2013, 2005, 2007). Hanno sempre avuto grande influenza, inoltre, i corsi torrentizi affluenti, spesso caratterizzati da flussi sovrabbondanti in seguito ad oscillazioni del clima e per via di un già significativo impatto del disboscamento (Cremaschi 2017) in età antica, contestualmente alla colonizzazione dell'area (Balista 2018, p.151-152). Sono stati individuati (Bovolato 2011-2012, p.19; Balista et al 2015, p.312) tre assetti principali corrispondenti ad altrettante macro-fasi cronologiche, determinate in base alle analisi radiometriche dei depositi torbosi, alle fasi archeologiche dei siti ad essi stratigraficamente associati, e in accordo alle analisi petrografiche dei carichi sabbiosi effettuate sui bacini di pertinenza (Balista 2013). Una prima fase idrogeologica di prima età Sub-Boreale (Balista 2009) (che sarà in seguito obliterata dalle torbe della paleovalle del Menago) risulta precedente e coeva al sito di Canàr (S.Pietro Polesine, RO) e comprende il paleoalveo di Perteghelle e il Paleoalveo del Raccordo. Il sito di Canar (Salzani 2002b; Balista 1998; Balista, Bellintani 1998; Salzani et al. 1996; Whitehouse 1990; Salzani 1986) vide far seguito ad una prima fase "post-palafitticola" una fase di impostazione dell'abitato in suolo asciutto. Successivamente ad una serie di processi locali di anastomosi dei corsi fluviali dai meandri più accentuati, seguì una fase di rettificazione. L'effetto conseguente fu una ridotta capacità di drenaggio del Tartaro che determinò, di conseguenza, un incremento delle acque presenti nel sottosuolo. A compromettere la stabilità dell'area anche l'abbondante presenza di rilievi dossivi, creando un presupposto favorevole a conseguenti fenomeni di ristagno idrico, intorbamento e formazione di limi organici. Questa seconda fase, di cui si

stima la durata tra il Bronzo Medio e il Bronzo Recente, corrisponde alla presenza attiva dei corsi del Tartaro basso, alimentati dal paleo-Tregnone e dal paleo-Menago; in questa fase il Tartaro curvava all'altezza di Torretta Veneta in direzione sud e percorreva le Valli Alto Polesane sino a collegarsi con il Po di Adria nei pressi della località di Marzanata (circa 3 km a sudovest di Trecenta) (Balista 2009, p.84). Attestazioni indirette del tendenziale impaludamento dovuto ai dissesti idrologici in questa fase sono le tracce, nei pressi degli insediamenti, di tentativi di stabilizzazione degli acquiferi superficiali, come i canali di drenaggio rilevati in località Campestrin (Salzani 2011, Bellintani et al. 2015). Un'altra evidenza significativa, interpretata come misura di contrasto alla stagnazione delle colture (cfr. Balista et al. 2016, Nicosia et al. 2011), è la messa in opera del grande costruito arginale detto SAM (cfr. *infra*). Anche il ciclo vitale dell'insediamento di Canova, circoscritto alla fase di Bronzo Recente 2 (Vanzetti 1997; Balista et al 1992) sembra testimoniare uno stato di instabilità generalizzata del paesaggio, che nel caso specifico avrebbe comportato, in seguito ad un periodo di stabilizzazione, una repentina disattivazione del cosiddetto "paleoalveo di Canova", originato da una diversione del Po (De Guio et al. 2010, p.98). Una terza fase più recente è inquadrabile tra il Bronzo Finale e l'inizio dell'età del Ferro ed è associata al clima umido-fresco che caratterizza la transizione dal periodo Sub-Boreale al Sub-Atlantico; a questo ciclo, a cui sono riferite le coperture alluvionali (la cosiddetta "alluvione Ferro") che hanno sigillato i grandi siti arginati nell'area (De Guio et al. 2011, p. 91), si associano la diramazione fluviale presso il sito di Fabbri dei Soci e il passaggio al corso del Tartaro alto, verosimilmente in relazione (Balista 2013) con l'evoluzione di corso del cosiddetto Po di Adria 1 nel più rettilineo corso del cosiddetto Po di Adria 2. Il fiume Tartaro, scolmatore del sistema paleoidrografico di risorgiva e affluente del Po di Adria, avrebbe avuto un ruolo-chiave sia in quanto corpo idrico connettivo che in quanto asse di comunicazione principale per l'alta pianura, le morene gardesane e la valle dell'Adige con la costa Adriatica presso le foci del Po (Balista et al. 2015, p. 312). Il caso del cambio di rotta del Po di Adria risulta di particolare interesse in quanto fattore associato, da un lato, alla rarefazione insediativa delle Valli Grandi Veronesi nella tarda età del Bronzo (Piovan et al. 2010; Piovan et al. 2012) e, dall'altro, al successivo emergere di importanti insediamenti nell'area polesana più a sud, aventi come centro egemone per via di una posizione strategica l'insediamento di Frattesina a Fratta Polesine (Bellintani et al. 1968; Bellintani 1990; Peretto 1984, 1985, 1986; Pearce 2019; Pearce, De Guio 1999).

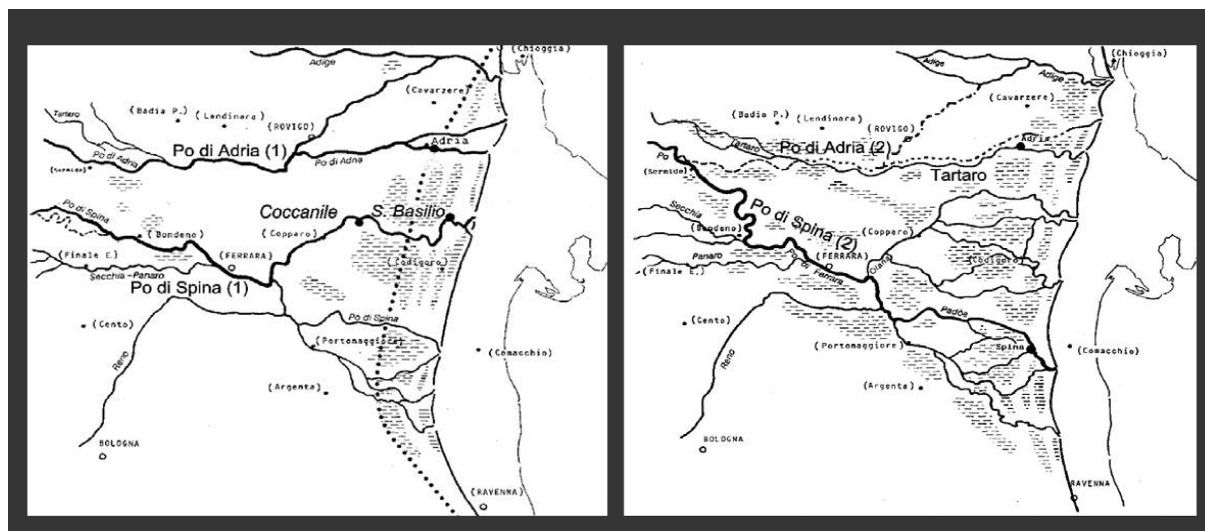


Fig. 9. Restituzione grafica delle principali paleoidrografie incluse nell'area VGVM - Alto Basso Polesine. A sinistra, sono evidenziati a nord il corso del primo Po di Adria (Po di Adria 1) e a sud il primo Po di Spina (Po di Spina 1) in rapporto alla linea di massima ingressione marina di età medio-olocenica e le principali linee di costa di età Sub-Boreale (A) e Sub-Atlantica; il periodo di attivazione di queste idrografie primordiali è stato ricondotto all'arco cronologico compreso fra il Bronzo Antico-Medio e il Bronzo Recente. A destra sono indicati i corsi più recenti del Po di Adria (Po di Adria 2) a nord e del Po di Spina (Po di Spina 2) a sud (estratto da: Balista 2013, pp.175-176, mod. da Bondesan 1990).

2.3. Protostoria della bassa Veronese e del territorio Veneto attraverso la lettura dei dati archeologici

Il Bronzo Antico

Durante l'inizio del BA1 (o BA1a secondo De Marinis 1999, 2002), corrispondente grossomodo alla metà del XXI sec. a.C., si diffonde rapidamente in tutta l'area, come anche nei pressi del Garda e dell'Alto Polesine, nella pianura patavina sud-occidentale e nell'areale dei colli Berici ed Euganei, la cosiddetta *facies* di Polada. Il popolamento in questa fase appare prevalentemente orientato su specifiche aree caratterizzate da un ambiente umido e situate in prossimità di bacini idrici chiusi ai fini di uno “*sfruttamento del territorio per la produzione primaria*” (Balista, Leonardi 2003, p. 159), e dunque un'economia di tipo agrario-allevatorio (Peroni 1996; Balista, Leonardi 2003; De Marinis 2010). Soprattutto nel periodo iniziale si attesta la presenza di numerosi insediamenti su palafitta posti in corrispondenza

delle rive del lago di Garda e in diversi bacini inframorenici posti nelle adiacenze del lago (De Marinis 1997, 2002). Le evidenze archeologiche sembrano indicare una notevole omogeneità interna, nonostante l'esistenza di aspetti distintivi a livello micro-regionale che testimoniano un'influenza alloctona (in particolare riferibile alla cultura Wieselburg-Gata), attestati a Dossetto di Nogara, Montalto di Nogara e soprattutto presso il sito di Canàr. Quest'ultimo rappresenta un caso interessante non solo per la collocazione nell'area di studio, ma anche per la particolare tipologia di abitato, perimetrato da una serie di fossati drenanti "a U" e palizzate, e occupato da abitazioni su impalcato aereo basso con pali a plinto (Balista 1998). Quelli menzionati sono le principali attestazioni insediative delle zone umide appartenenti al sistema fluviale Tione-Tartaro-Menago, che nel BA1 sembra attraversare una fase occupazionale ancora discontinua. Dossetto, Montalto e Canàr consistono in eccezioni che sono forse indizio di una fase insediativa pioniera nel territorio (Leonardi, Cupitò 2013). Nella fase successiva del Bronzo Antico 2 compaiono a nord del Po i primi nuclei insediativi anche nel territorio planiziaro, in corrispondenza di antiche diramazioni di fiumi come il Mincio, il Chiese, l'Oglio, e tra i corsi di risorgiva (Tartaro, Mella, Fossa Molinella) andando ad occupare gli ultimi cordoni morenici fino al Po e mantenendo una predilezione per ambienti topograficamente depressi, potenzialmente umidi ed il conseguente impiego di strutture di tipo palafitticolo (De Marinis 1997, p.407). Sono inoltre presenti nel territorio piccole aree abitate e poco distanziate, per cui sono stati ipotizzati piccoli spostamenti, in intervalli di tempo relativamente brevi, delle medesime comunità di appartenenza alla stessa nicchia eco-geografica (Peroni 1996). Fulcro del sistema insediativo sembra comunque rimanere l'areale palafitticolo benacense, in cui sono presenti numerose evidenze di un rapporto di comunicazione costante con i territori nord alpini (Hundt 1974 e David Elbiali 2000, cfr Leonardi, Cupitò 2013). L'asse di collegamento con l'Europa centro-orientale (e in particolare l'area danubiana) come direttrice principale degli scambi doveva essere quello preferenziale, ne danno indizio anche i ritrovamenti a Canàr di materiali in faience e di alcune fogge ceramiche (cfr. Salzani et al. 1996; Bellintani 1987). Riguardo l'assetto ideologico e sociale, la pressoché totale assenza, ad oggi, di testimonianze di tipo funerario in area palafitticola suggerisce una prassi rituale (associabile ad un culto degli antenati) riservata a un circoscritto numero di individui (Leonardi 2012).

Il Bronzo Medio e Recente

E' con l'inizio del bronzo Medio che il popolamento della pianura Padana diviene più evidente e sistematico sia a nord che a sud del Po, e compaiono contestualmente anche le prime attestazioni di abitati delimitati da un fossato e da un terrapieno (cfr. Balista et al. 2008). Sotto l'aspetto della cultura materiale, si vede affermare l'aspetto di Camponi di Nogarole Rocca in gran parte del territorio veneto, sebbene con diverse interpretazioni decorative che denotano una distinzione tra l'area orientale e quella occidentale, la quale nelle successive fasi tra la metà del XVI e la seconda metà del XIV sec. a.C. svilupperà in questo senso soluzioni evolute, che trovano confronto con aspetti culturali della cultura sud-padana come Tabina di Magreta e Monteleoni (Leonardi, Cupitò 2013, p.209). Per quanto riguarda le modalità insediative, va affermandosi nella pianura veronese una “nuova”⁴ tipologia insediativa, già indiziaria di un'oculata gestione della risorsa idrica, che troverà nelle fasi successive pieno sviluppo nel modello terramaricolo vero e proprio, attestato dai sistemi di perimetrazione di Coron di Macaccari e, successivamente, Fabbrica dei Soci e Castello del Tartaro. La società presente appare fortemente organizzata sul piano interno, denotando una forte aggregazione di tipo comunitario, benchè non sia possibile, allo stato attuale, verificare la presenza di una gerarchizzazione intercomunitaria a livello di organizzazione territoriale (cfr. Cardarelli 2010; Di Renzoni 2006). Nella seconda fase dell'età del Bronzo medio si registra una cesura, decisamente più evidente nel settore planiziario, caratterizzata da un processo di aggregazione in villaggi appartenenti a questa tipologia che sarà a posteriori definita, appunto, “terramaricola” (De Marinis, 2010, p. 536). Si osservano in questa fase:

- un netto incremento demografico, a cui si associa la nascita di numerosi nuovi siti, non diversamente da quanto accade anche nel resto del mondo terramaricolo (Belluzzo, Tirabassi 1996, p.140),
- una riconfigurazione dell'assetto “eco-culturale”: la strategia locazionale per gli abitati risulta più indirizzata verso fasce ecotonali “franche”, probabilmente in quanto più estese e più adatte alle pratiche agricole rispetto alle zone umide, dove le fluttuazioni climatiche a livello locale potevano garantire una minore stabilità dei cicli produttivi. Si ipotizza che il nuovo tessuto insediativo si sia quindi sviluppato in territori più stabili, in cui una prima frequentazione sperimentale era stata praticata attraverso

⁴ Pur richiamando, in parte, la struttura già presente a Canà.

attività *off-site* (Balista, De Guio 1997). Lo spazio agrario non doveva essere ancora fortemente capillarizzato.

- tre fenomenologie demografiche, in co-occorrenza diagnostica, indiziarie di un processo di polarizzazione se considerate contestualmente al generale incremento demografico: la cessazione dell'esistenza di alcuni siti minori (come Stanghelle e Massaua); una contrazione tangibile delle evidenze *off-site* in favore di elementi più propri del *near-site*; l'enuclearsi di due siti estesi come Castello del Tartaro e Fondo Paviani, che per la loro entità appartengono al "primo rango" del sistema insediativo (cfr *infra*).
- una "canalizzazione evolutiva" in cui si creano precondizioni, materiali (come la produttività dell'ambiente) e immateriali (come l'organizzazione a livello sociale), per un incremento della complessità in più aspetti del nuovo sistema antropico.

La metallurgia del bronzo dell'epoca rivela inoltre una persistenza delle relazioni di scambio a lungo raggio tra Veneto occidentale ed Europa centro-orientale (Leonardi, Cupitò 2013, p.202)⁵. Nuclei funerari con ricchi corredi coesistono già in questa fase con tombe prive di corredo nei medesimi contesti necropolari; a partire dalla fase avanzata del BM3 coesistono anche il rituale inumatorio e quello incineratorio (cfr. Baratella, Cupitò 2015). Nella presenza di indicatori di status s'individua l'emergere di un ceto egemone, comprendente anche donne e infanti, in via di consolidamento. Nel periodo a cavallo tra BM e BR vengono in effetti a riconfigurarsi processi critici nell'interazione uomo-uomo, uomo-ambiente e forse ambiente-ambiente. Ne scaturisce una trasformazione a livello sociale, ma anche una rivoluzione nel paesaggio, ora reinterpretato nella funzione di coltivo intensivo, rete di scambio e scenario di potere, il quale si riflette in un'apparente ripartizione gerarchica del territorio. Un esempio evidente ed eccezionalmente preservato di paesaggio agrario e connettivo è lo spazio intersito fra Castello del Tartaro e Fondo Paviani (cfr. Vanzetti 1997), ove le tracce teleosservabili di infrastrutture consentono di individuare per questa zona specifici livelli funzionali. I nuovi abitati sorgono su alti morfologici ed in posizione eccentrico-periferica rispetto a questi due siti maggiori.

⁵ Gli autori fanno riferimento da un lato all'area berico-euganea, con elementi di ascendenza Wieselburg-Gáta e forse Cetina, dall'altro alla pianura veronese e all'Alto Polesine, con le occorrenze presenti nel Colognese, a Dossetto e Montalto di Nogara e, in particolare, a Canàr.

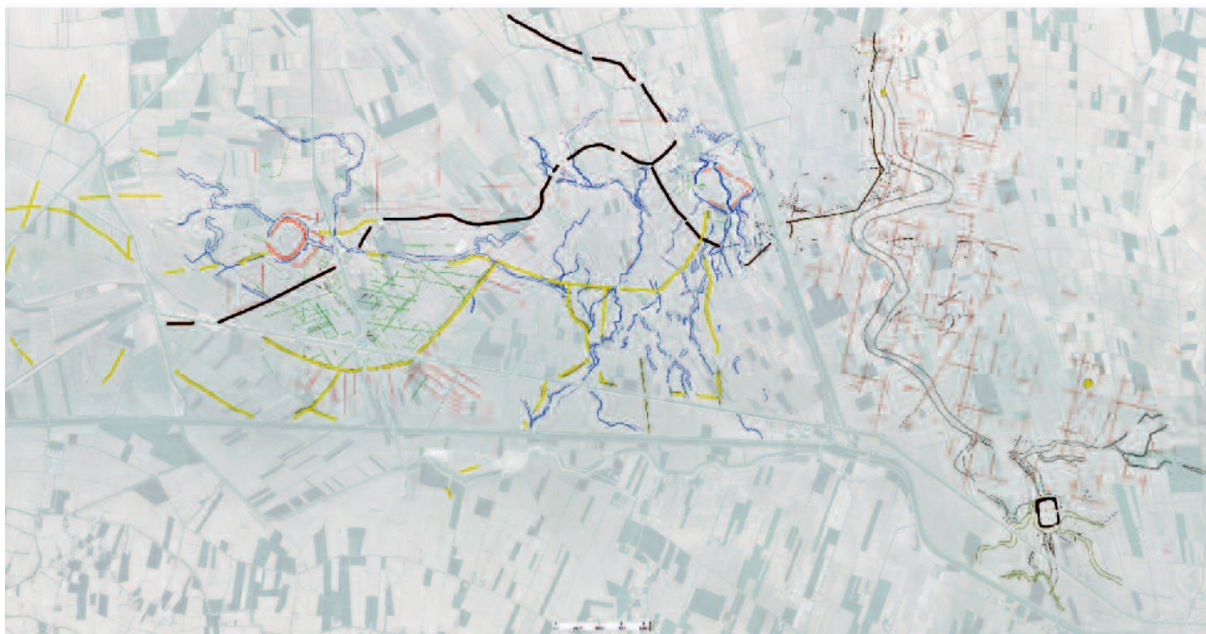


Fig. 9. Fotointerpretazione: infrastrutture arginali, idrauliche, connettive e paleoidrografie nell'area di studio. I vari elementi telerilevati sono stati sequenziati e analizzati da A. Betto (Betto 2012-2013) secondo una logica di tipo "harrisiano" (cfr. De Guio, 2021)

E' stato dunque proposto che, ad una prima fase "implosiva" nella distribuzione antropica locale, sia seguita una successiva "proiezione centrifuga" con il configurarsi, nel Bronzo recente, di una vera e propria *polity*⁶ (cfr. Renfrew 1984; De Guio 1990), la cui fortuna dipese forse anche dalla collocazione in uno spazio di risorse di marcata unità fisiografica. L'elemento insediativo maggiormente caratterizzante per il mondo terramaricolo, e in particolare delle stazioni di primo rango o *central place*, è il già menzionato e ben noto modello aggere-recinto (De Guio 1997, p.159), la cui presenza pone l'accento sull'organizzazione di tipo gerarchico nel territorio avente come poli primari i siti più estesi e apparentemente più articolati. L'area palafitticola benacense sembra invece rimanere ai margini di queste consistenti trasformazioni, contestualmente ad una contrazione della presenza insediativa nel territorio perigardesano. Il modello di abitato con terrapieno e fossato perimetrale, che nel BR prende piede anche nella pianura patavina sud-occidentale, solo nell'areale delle Grandi Valli Veronesi trova piena espressione in siti non solo di medie, ma anche di grandi (Fabbrica dei Soci, Lovara, Castello del Tartaro) e grandissime (Fondo Paviani) dimensioni. Viene così a costituirsi un sistema più complesso, reso dalla più spiccata

⁶ Secondo un'accezione di sistema circoscritto a non più di un migliaio di soggetti, articolato strutturalmente secondo rango, ma non ancora propriamente gerarchizzato (Earle Johnson 1987, p.303).

eterogeneità dimensionale e da una specifica gerarchizzazione occupazionale in cui emergono i siti di rango più elevato. La densità di distribuzione e le interdistanze dei siti nel tessuto della *polity* risultano correlate al loro rango (ad esempio riducendosi tra siti minori). Interessante in questo senso il caso del deposito votivo di Corte Lazise (Salzani 1994a, cfr. Salzani 1994b), che non solo rientra nel presunto *power catchment* (territorio di competenza) di Fondo Paviani, ma si trova anche in posizione liminare rispetto a diversi sistemi di riferimento territoriali (è in un bacino di ristagno umido, ai limiti dello spazio controllato da Fondo Paviani e forse dell'intera *polity*). Lo stesso paesaggio funerario (*landscape of death*) esprime forse possibili segnali di dominanza nelle scelte locazionali, nell'estensione, nell'articolazione spaziale, nell'accessibilità e nella "segnaletica di superficie" (De Guio 1997, p.155). Questa massiva evoluzione sistemica trova ovviamente riflesso anche nella cultura materiale, in questo periodo sempre più abbondante (come attendibile in un momento di grande crescita demografica come l'inizio del Bronzo Recente). Nel Bronzo Recente I l'area del veronese (così come, se pur con differenze anche notevoli nelle soluzioni decorative, la pianura patavina sud-occidentale, il comprensorio berico-euganeo e il Polesine) è interessata dalla diffusione di tratti tipicamente subappenninici come le anse cilindrorette e le anse lobate/rostrate (cfr. Peroni 1959, Cocchi Genick 2004, Ventura 2005-2006, Cattani 2009, Frontini 2011). Nella fase successiva di BR2 si diffonde nella pianura veronese l'orlo a tesa, che per la sua cospicua e pressoché ubiquitaria presenza in area palafitticolo-terramaricola nordpadana è considerato un *marker* distintivo per il territorio veneto⁷ (Leonardi, Cupitò 2013, pp. 218-219). Su un piano più generale, è evidente una crescita dell'artigianato specializzato entro le comunità di villaggio, associato alla maggiore capacità di sfruttamento del territorio dal punto di vista produttivo (Cardarelli 2009, p.33). Si osserva una maggior concentrazione di classi di prodotti ed attività presso i siti di primo rango, in cui è attestata la lavorazione in situ sia di metalli, che osso-corno, che vetro (Bianchin Citton 1984; Bianchin Citton 1986; Malgarise 1989; Angelini et al. 2010, pp.71-86). A ciò si lega presumibilmente l'infittimento della rete connettiva e l'inserimento dell'area di studio all'interno di un circuito di scambio a corto (con le più prossime aree benacense e terramaricola), medio (con l'intera area padana, quella alpina, transalpina e peninsulare) e ampio raggio (che include contatti con

⁷ Mentre nella fase successiva, assieme alla decorazione a solcature e coppelle, consisterà in uno dei più importanti indicatori ceramici di continuità culturale tra il BR2 palafitticolo-terramaricola e il protovillanoviano (Leonardi 1979; Bagolan, Leonardi 2000).

il mondo egeo). Lo sviluppo di questa fitta rete di contatti è da considerare anche in relazione alla vocazione metallurgica dell'area. La direttrice di scambio nord-occidentale, ad esempio, fu probabilmente favorita da un'agevole connettività sia con l'area benacense che con la regione mineraria trentino-tirolese, grazie anche ai vettori naturali di collegamento con la valle dell'Adige e l'alta pianura vicentina (Cardarelli 2009, p.34). L'enclave bassoveronese avrebbe inoltre avuto un ruolo all'interno di un sistema economico "globale", che coinvolgeva l'entroterra europeo, il Mediterraneo orientale e l'Egeo. Ciò dovette favorire l'approvvigionamento di materie prime, e contestualmente la circolazione di alcune categorie di beni di lusso (ambra, oggetti di pregio metallici, ceramica egea sia alloctona che autoctona) di cui è rimasta traccia (cfr. ad esempio Cupitò 2011; Cupitò et al. 2015; Bettelli et al. 2015). Così come le relazioni di scambio, anche le trasformazioni nel paesaggio si prestano ad un'osservazione su più livelli dimensionali: Castello del Tartaro ne costituisce l'esempio ideale per via del suo hinterland agrario, in cui si distinguono un *off-site* ("fuori-sito") e un *near-site* ("vicino al sito") cui corrispondono distinte identità funzionali. Il mantenimento di una campagna così fortemente articolata e dalla vocazione agricola intensiva dovette necessitare, ragionevolmente, di un'entità amministrativo-gestionale sufficientemente forte. L'aumento della complessità in molteplici aspetti della produzione (e non solo) avrebbe reso il sistema più esigente in termini di manodopera, ora controllata da un'*élite* che aveva il controllo sulla costruzione e manutenzione delle infrastrutture (Cardarelli 1997, p.654). L'insieme dei dati a disposizione, anche dalle aree funerarie, portano a validare l'ipotesi dell'esistenza di un "paesaggio di potere" all'interno delle Valli Grandi Veronesi, funzionalmente articolato anche al suo interno, e con un livello di complessità commisurabile a quello di un *simple chieftdom* (De Guio 1997, p.155).

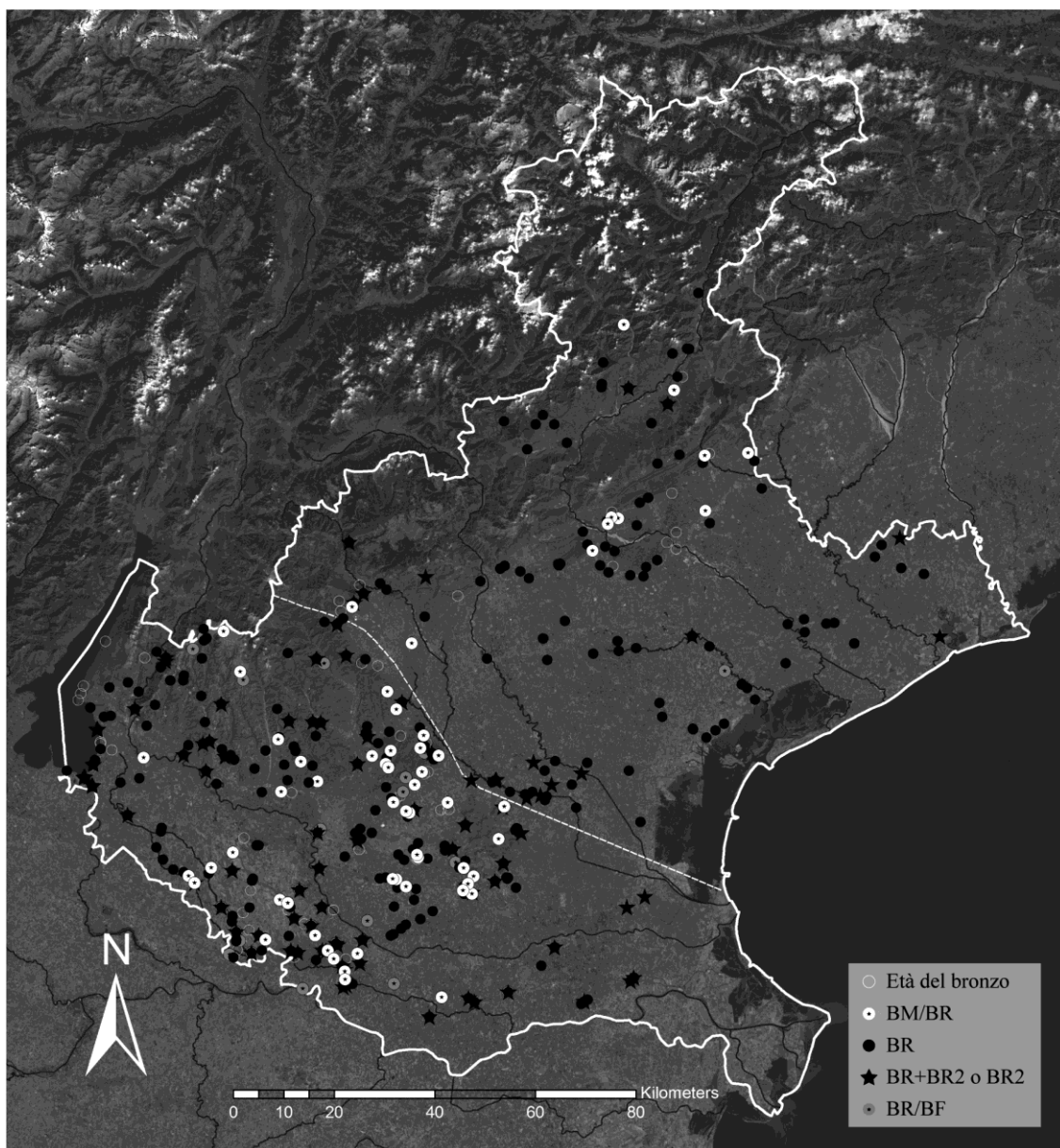


Fig. 10. Carta del popolamento nel BR (da Leonardi, Cupitò 2013, elabor. D. Vicenzutto).

Il Bronzo Finale

Con il Bronzo Finale, mentre nel resto della penisola italiana il moltiplicarsi di complessi archeologici in ogni categoria (Bietti Sestieri 1996, p.9) indizia una fase di crescita, il record in Pianura Padana indica al contrario un momento di crisi generale, che vede dapprima un ridimensionamento degli areali insediati e successivamente un abbandono massivo della maggior parte dei villaggi arginati (Bianchin Citton 2015, p. 254). Le evidenze di abbandono nel territorio a nord del Po, e più specificamente il territorio delle Grandi Valli

Veronesi, sembrano assumere connotati differenti rispetto all'area sub-padana, dove una cesura netta è tangibile sia nel record archeologico che nell'apparente disattivazione di tutti gli insediamenti rappresentanti la fase precedente (De Marinis 2010, p. 543; Bernabo' Brea, Cardarelli, Cremaschi 1997; Cardarelli 2010, p.475). Il collasso appare manifestarsi più tardivamente e in forma meno drastica: alcuni centri come Fabbrika dei Soci e Fondo Paviani conservano evidenze di sopravvivenza anche per questa fase, pur trovandosi ora all'interno di una nuova e meno fitta rete insediamentale (De Marinis 1997, pp.405-422). In questo nuovo sistema delocalizzato trovano sviluppo nuovi centri come Veronella, Montagnana e Frattesina, collocati strategicamente in aree di controllo di vettori di comunicazione cruciali, come la valle dell'Adige, il Po e l'alto Adriatico⁸. In una scala più ridotta, un complesso sistema di scambi, in parte già attivo nel BR, doveva connettere anche il polo polesano ai grandi insediamenti della Bassa pianura Veronese. Il già citato ripostiglio di Corte Lazise presso Villabartolomea e il deposito di Pila del Brancon (Nogara) serbano testimonianza, nella cultura materiale, di questi scambi nella fase di transizione tra BR2 e BF1. Con la progressiva caduta nel corso del XII sec. a.C. dei siti arginati delle Valli Grandi Veronesi, si vanno delineando nello stesso comparto nuovi poli insediativi che hanno piena attivazione nel BF2. Alla confluenza tra Tione e Tartaro si concentrano i due nuclei abitativi di Cop Roman e Turbine-via S. Pietro e le rispettive aree funerarie Colombare e Ponte Nuovo. Alla sinistra idrografica dell'Adige va a costituirsi il polo demografico di Veronella/Albaredo d'Adige con l'abitato di Sabbionara (n. 16) e la grande necropoli di Desmontà (Bianchin Citton 2015, p. 257-258). Per la fase più recente del BF si attesta inoltre la riattivazione per alcuni siti presenti lungo la fascia più settentrionale delle Grandi Valli, come Perteghelle di Cerea, più ridotto in estensione e rilevato, dove vengono rimessi a coltura i suoli circostanti in precedenza dismessi (Belluzzo, Salzani 1996, pp. 84, 88, 117-118; Balista et al. 2006, pp.104-107). Tra l'VIII e VII secolo anche Terranegra di Legnago e Lovara di Villabartolomea saranno rioccupati dopo un periodo di abbandono (a fine BR), recuperando e consolidando strutture difensive preesistenti e riattivando il sistema di canalizzazioni (Guidi et al. 2008, p.23; Rizzetto 1996, pp. 287-290; Salzani 2002a, pp.170-171); sorgerà inoltre, nell'attuale comune di Cerea, l'insediamento (e relativa area funeraria) di S. Vito (Salzani 2002a, p.176).

⁸ Cui si associa, già alla fine del XII sec. a.C., una rifrequentazione delle regioni nord-adriatiche proprio in quanto aree di cerniera tra l'oltralpe e il mondo egeo, i cui scambi attraverso il corridoio adriatico erano persistiti anche nel periodo precedente (cfr. Cassola Guida 1999; Bianchin Citton 2009).

Le evidenze presso i succitati contesti manifestano tuttavia una fase di disattivazione per tutto il periodo antecedente, a cui corrisponde una contrazione insediativa generalizzata: questi fenomeni di rioccupazione sono dunque stati interpretati (da ultimo, De Guio c.s.) come già appartenenti ad uno scenario “post-crisi”.

2.4. Lo sfruttamento e la gestione delle risorse

Un’importante chiave di lettura per una comprensione delle dinamiche che si svilupparono contestualmente all’evoluzione dell’apparato terramaricolo, al suo apogeo e, in ultima istanza, al suo collasso consiste nella gestione delle risorse disponibili del territorio che fu teatro di questa civiltà. I dati archeobotanici rilevati in Pianura Padana per gli insediamenti delle fasi più recenti dell’età del Bronzo segnalano una forte pressione antropica sul territorio, che risulta particolarmente evidente contestualmente al moltiplicarsi degli abitati e al sensibile incremento demografico durante il periodo climax nella seconda metà del Bronzo Recente. La trasformazione del paesaggio è un processo che ebbe inizio già nel Bronzo Antico: ne sono testimonianza le serie polliniche relative all’area palafitticola⁹, ma non si esclude che in maniera più graduale e capillare il fenomeno possa aver interessato anche altre aree pianiziarie (quantomeno a sud del Po) già prima dell’attivazione del complesso terramaricolo. Se è plausibile una presenza di aree inter-sito forestate ancora relativamente estese durante il Bronzo Medio, è evidente che l’espansione demografica e il conseguente aumento dello spazio occupato dalle zone abitate deve aver non solo eroso ulteriore spazio boschivo per lasciare spazio ai villaggi, ma soprattutto deve aver richiesto un ingente impiego di legname: si attesta infatti per il Bronzo Recente un drammatico calo in questo senso (Nisbet, Rottoli 1997; Cremaschi et al. 2006; Mercuri et al. 2006; Mercuri et al. 2010; Marchesini et al. 2010). Stime proposte per il costo, i termini di legname, per la terramara di Santa Rosa di Poviglio, ad esempio, fanno pensare che la messa in opera nonché la manutenzione delle strutture di un solo centro abitato di medie dimensioni richiedesse l’abbattimento di ettari di bosco (Cremaschi 2009a), senza contare l’impiego per le attrezzature necessarie alla costruzione (Castiglioni et al. 2009). Tale idea sembra confermata anche dalle rare documentazioni fotografiche ottocentesche e, soprattutto, dalla scoperta della vasca votiva di Noceto (Cremaschi 2009b, Bernabò Brea, Cremaschi 2009), che dà un’idea di quella che fosse

⁹ Per un’analisi dei dati pertinenti all’area benacense si rimanda a Perego et al. 2011.

l'importanza della risorsa-legno, della perizia degli artigiani specializzati nella sua lavorazione e del largo uso di questo materiale in molteplici forme (Cremaschi 2017, p.7). Studi antracologici e delle palificazioni negli abitati hanno consentito, inoltre, di dimostrare come la maggior parte del legname da costruzione provenisse da querce abbastanza giovani (20 o 30 anni) e pertanto da piante di bosco ceduato, quindi già sfruttato in precedenza (Maini 2012, p.21). La deforestazione dovette procedere di pari passo non solo con la costruzione dei villaggi ma, più in generale, con la necessità di reperire nuove terre per fronteggiare l'aumento demografico e da sfruttare sia per l'attività agricola che per il pascolo. Della superficie disboscata (Ravazzi et al. 2004; Mercuri et al. 2006) gran parte dello spazio doveva essere infatti dedicato a prati e pascoli, destinati a sostenere la fauna domestica, largamente dominante nello spettro zooarcheologico analizzato presso i siti terramaricoli. Le specie principalmente allevate erano caprovini, bovini e suini, e si ritiene significativo che proprio durante il Bronzo recente in diversi contesti (ad esempio a Santa Rosa di Poviglio, ma anche a Montale) si registri un aumento di ovini e caprini a scapito dei suini: i primi (le capre in particolare), infatti, tendono a prediligere come habitat spazi aperti e hanno una maggior tolleranza rispetto ad altre specie di aree più siccitose (De Grossi Mazzorin, Riedel 1997; Riedel 1996; Riedel 2004). Anche l'attività agricola, ad ogni modo, ebbe senz'altro un ruolo fondamentale nella trasformazione del paesaggio, e dovette al contempo riorganizzarsi in molteplici soluzioni per far fronte a spazi ora assai più limitati e, con il trascorrere del tempo, sempre meno produttivi. La rapida "colonizzazione" di tutto il territorio da parte di una nuova, fitta rete di insediamenti avrebbe portato contestualmente ad un'agricoltura meno estensiva, ad una scelta più oculata delle specie da coltivare e a pratiche per il mantenimento della produttività del suolo. La scelta delle specie coltivate doveva avvenire sia in base alla disponibilità che alle condizioni ambientali più o meno idonee. Dal record archeologico emerge comunque, in generale, un forte sviluppo, tra le piante eduli, dei cereali, che dovevano rappresentare l'opzione più adatta al mantenimento di un grande numero di persone. Il valore alimentare dei cereali dipende soprattutto da un elevato contenuto in carboidrati complessi sottoforma di amido. Sono presenti anche proteine, tuttavia di modesta qualità il che comporta l'integrazione con altri tipi di alimenti come, nel caso dei vegetali, le leguminose (Colonna, et al. 2013, p. 23; Debandi 2021, p.88). In tutta la Pianura Padana sono presenti suoli con diversi livelli di compatibilità, ma generalmente buoni per le coltivazioni cerealicole, il cui largo impiego dovette contribuire allo sviluppo di tecniche produttive sempre più specializzate. In

area veneta in particolare, le analisi pertinenti all’abitato di Fondo Paviani indicano una cerealicoltura particolarmente articolata e variegata. Le particolari condizioni ambientali presenti in loco hanno favorito la conservazione di macroresti vegetali sia combustibili che non combustibili (Berto et al., 2015; Berto, Rottoli 2015, p.830). Per la prima fase insediativa del sito, in concomitanza con l’aumento di specie tipiche dei prati o dei pascoli (ad es. *Poaceae*, *Asteroidae*, *Cichorioideae*, *Leguminosae*) e altri indicatori antropici vegetali come malerbe e piante ruderal-nitrofile (*Chenopodium*, *Cichorium intybus*, *Urtica*, *Polygonum aviculare*) risultano aumentare i cereali (*Hordeum*, *Avena*, *Triticum*) (Dal Corso et al. 2012, p.76). Dal trattamento dei campioni raccolti nell’area del sito nel corso delle campagne di scavo 2008-2011, appartenenti pressoché totalmente alle fasi di Bronzo Recente, le analisi dei macroresti effettuate su alcuni contesti dell’abitato e nei livelli riempitivi del fossato perimetrale hanno confermato la coltivazione di orzo (*Hordeum vulgare*), farro (*Triticum dicoccum*), farricello (*Triticum monococcum*), “nuovo frumento vestito”, frumenti nudi (*Triticum aestivum/durum/turgidum*), miglio (*Panicum miliaceum*) e quasi certamente anche il panico (*Setaria italica*), sebbene con una presenza decisamente meno importante. Da una buca di palo rifunzionalizzata ancora in età protostorica come rifiutaia (BR1 avanzato-BR2) e indagata nel corso della campagna 2010 è stato recuperato, assieme a pochi resti appartenenti a leguminose, frutti e piante infestanti, un ingente accumulo (34 kg) di cereali: frumenti (per lo più del tipo vestito), orzo, farro, farricello e spelta. I frumenti vestiti, e in particolare il farro, sembrano aver costituito la componente dominante nelle colture locali.

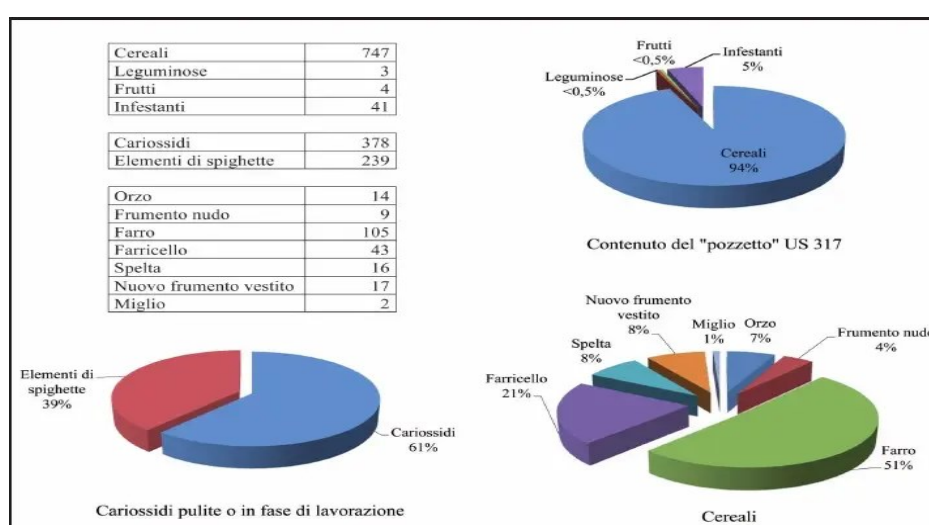


Fig. 11. Grafi riiepilogativi del contenuto del “Pozzetto” – US 317 rinvenuto a Fondo Paviani (da: Berto, Rottoli 2015 p.832).

In generale, i frumenti godono di un'ampia varietà anche grazie ad una grande capacità di ibridarsi (anche spontaneamente) e divenire maggiormente fertili. Se solitamente nei paesi con clima più freddo si preferiscono frumenti teneri, quelli duri sono tipici dei paesi con clima più temperato. La semina, secondo i metodi tradizionali dell'agricoltura non meccanizzata, può avvenire "a spaglio", cioè gettando a mano i semi sul terreno oppure "a solco", preparando dei solchi in cui porre delle cariossidi singole o gruppetti di chicchi. In età preindustriale si usava effettuare una sarchiatura per rimuovere le erbe infestanti e zappare il terreno intorno alle piantine per aerare il suolo (Carra 2012, p.33). Il piccolo farro o farricello (*Triticum monococcum* L.) è tra i primi frumenti vestiti addomesticati dall'uomo. E' una pianta di taglia media, in genere più alta e con un ciclo vegetativo più lungo (circa 11 mesi) rispetto ai frumenti teneri. Ha una buona compatibilità con suoli poveri e aridi, tuttavia non ha una grande resa dal punto di vista alimentare: ogni spighetta contiene in genere una sola cariosside fertile (Carra 2012, p.35). Più produttivo il farro (*Triticum dicoccum*), frumento tetraploide le cui spighette contengono due (o, più raramente) tre cariossidi. Si ipotizza che proprio questa sia una delle ragioni per cui la domesticazione del farro sia stata più rapida di quella del farricello (Carra 2012, p.37). La tecnica di coltivazione tradizionale del farro, inoltre, non richiede quasi uso di fertilizzanti e per una buona crescita non necessita della preparazione di un letto di semina particolarmente accurata. Una delle ragioni del successo di questa specie risiede potrebbe essere dovuta anche alla sua bassa onerosità in termini di manodopera, oltre che per un limitato impatto ambientale e la sua versatilità (è utilizzato anche come cibo per animali). Uno svantaggio del farro, tuttavia, è che necessita di una maggiore perizia nella raccolta più tardiva rispetto al grano tenero, che si svolge tradizionalmente dalla metà di luglio alla metà di agosto rispetto ad altri frumenti per via di un rachide molto fragile (Carra 2012, p.38). Il farro grande (*Triticum spelta* L.) è un frumento esaploide¹⁰ vestito. E' uno dei cereali che risulta più presente in Europa (soprattutto in Germania meridionale, Svizzera e Inghilterra del sud) durante l'età del Bronzo e l'età del Ferro, e rappresenta una novità rispetto alle colture tipiche del Neolitico (Fiorentino et al. 2004, p. 222). In nord Italia risulta diffuso in particolare lungo la valle dell'Adige, in area gardesana e nelle Alpi Cozie (cfr. Nisbet 1994). Ha potenzialità produttive superiori a quelle del farro, tale potenziale può tuttavia essere pienamente espresso solo in condizioni

¹⁰ Con *ploidia* ci si riferisce, in termini genetici, alla configurazione cromosomica di una specie. I vegetali possono essere non solo diploidi (configurazione tipica) ma anche triploidi, tetraploidi o addirittura esaploidi, con tre, quattro o sei serie di cromosomi.

pedoclimatiche favorevoli. Diversamente, questo cereale non risulta affatto competitivo rispetto al farro. Riesce a vegetare su suoli relativamente poveri, ma come habitat predilige terreni ben esposti (Carra 2012, p.42). Il gruppo dei frumenti nudi è una categoria non strettamente botanica. Si classificano, nelle analisi archeobotaniche, come frumenti nudi tutti quei frumenti dotati di cariossidi in grado di liberarsi dalle glumette che le avvolgono con la sola battitura. La categoria comprende sia frumenti tetraploidi che esaploidi, allo stato fossile non distinguibili fra loro dal punto di vista morfologico. Le due specie più rilevanti in questo gruppo sono il frumento duro (*Triticum durum* Desf.) e il frumento tenero (*Triticum aestivum* L.); quest'ultimo ha buone rese in particolare su terreni argillosi e sopporta discretamente il freddo invernale, ma al momento della levata richiede condizioni climatiche di caldo e asciutto (Carra 2012, p.44). L'orzo (*Hordeum vulgare* L.) deriva dall'orzo selvatico (*Hordeum spontaneum* C. Koch)¹¹, ed è con il frumento tra i più antichi cereali domesticati. L'orzo ha un accestimento maggiore rispetto ad altri cereali come il frumento, il che compensa maggiormente eventuali mancanze nella semina. In nord Italia la pianta fiorisce in primavera, generalmente intorno fine aprile, per raggiungere la piena maturazione con i primi caldi estivi. Rispetto al frumento come ad altri cereali autunno-vernini, l'orzo resiste inoltre meglio alla siccità e può sopportare alte temperature con un'umidità ambientale non troppo elevata. Resiste, infine, molto bene alla salinità del suolo, garantendo comunque una buona produzione. I terreni più adatti per l'orzo, ad ogni modo, risultano essere quelli aperti (ha una bassa capacità di competere per la luce), di medio impasto e ben drenati (Carra 2012, p.47). Il miglio (*Panicum miliaceum* L.) è una pianta di origine tropicale, ma è attestato in Europa nell'Età del Bronzo, italiani ed europei. Ha un ciclo colturale breve (circa 3-4 mesi), una prolungata e notevole capacità di accestimento e una buona resistenza alla siccità ed alle elevate temperature (è invece sensibile al freddo e ai ristagni idrici); non avendo particolari esigenze pedologiche si presta alla coltivazione in aree aride o semidesertiche e su suoli poveri. Tali caratteristiche lo rendono un cereale adatto all'impiego come coltura intercalare in terreni leggeri e sabbiosi, scarsamente dotati di umidità nel periodo estivo. E' inoltre utilizzato come secondo raccolto in estate a seguito della trebbiatura di un cereale autunnale-primaverile (Carra 2012, p.52). L'avena (*Avena sativa* L.), derivante addomesticata

¹¹ Tra le due specie, entrambe diploidi, esiste una grande affinità, e alcuni studiosi li considerano un'unica specie (*Hordeum vulgare* L. subsp. *spontaneum* C. Koch) in quanto interfertili tra loro. La differenza principale consiste nella fragilità delle spighe selvatiche, che permettono la dispersione per mezzo del vento (Carra 2012, p. 47).

dell'avena folle (*Avena fatua* L.) ha una minore produttività rispetto all'orzo ed è caratterizzata da un alto contenuto di cellulosa nelle cariossidi (che si presentano abbondantemente vestite) è molto utilizzata anche per la fienagione. Il maggior vantaggio di questo cereale è strategico, in quanto essa assume un ruolo importante all'interno della rotazione colturale. Ha ingenti consumi idrici (più alti di qualunque cereale ad esclusione del riso), è dunque particolarmente suscettibile ai climi caldi e aridi, mentre ben si adatta a climi più freschi e umidi che caratterizzano l'Europa transalpina (è infatti molto meno rappresentata in Italia, dove è considerata un cereale "minore"). E' poco esigente in termini di terreno: si adatta a terreni magri, acidi, compatti o sciolti, oltre che a suoli ricchi di sostanza organica mal decomposta (ciò la rende ottima nelle fasi di dissodamento di lande, boschi e prati), è meno adattabile, tuttavia, ad un eccesso di salinità. Viene di norma seminata all'inizio della primavera; la raccolta avviene in piena o tarda estate (Carra 2012, pp.49-50).

Oltre alla scelta e alla selezione delle specie vegetali, per il periodo in esame è già attestata una particolare attenzione alla loro produttività attraverso interventi sul suolo più o meno avanzati dal punto di vista tecnologico. Una delle più antiche pratiche di preparazione del terreno, il cosiddetto "taglia e brucia" o *slash-and-burn* (che dovette avere un ruolo in una prima, parziale deforestazione del territorio in età più antica), è senz'altro una soluzione rapida per eliminare le ceppaie e, nell'immediato, migliorare la fertilità del suolo dal punto di vista chimico (Sereni 1979; Forni 2011, pp. 33, 39; Maiorana, Fornaro 1989), aumentarne la porosità ed eliminare organismi nocivi. La combustione di tutte le sostanze organiche superficiali crea tuttavia ingenti danni a lungo termine alla flora batterica del terreno e solitamente favorisce la crescita di piante infestanti; si tratta dunque di una pratica non adatta ove sia d'interesse conservare la redditività a lungo termine. Il metodo ha successo (cfr. Boogard 2005, p. 178; Boserup 1965) secondo una logica in termini di risparmio di tempo e non di efficienza sostenibile: se una rigenerazione ottimale del suolo richiedeva dai 10 ai 20 anni (Harris 1990, p. 76), in un contesto come quello terramaricolo la priorità era probabilmente garantirsi continuità nello sfruttamento (peraltro non illimitato) dei terreni. Si ritiene pertanto, per le fasi più avanzate dell'età del Bronzo, che la pratica del taglia e brucia fosse applicata molto marginalmente, contestualmente al primo taglio della copertura arborea in nuovi terreni sfruttati o in aree periferiche che avevano subito un abbandono più duraturo (Debandi 2021, p.54, Cremaschi 2009b, p.36). Pur essendo evidente per questa fase una sinergia tra deforestazione e attività antropiche come la costruzione degli abitati o strumenti e

altre attività produttive (Sadori et al. 2004), le pratiche agricole del tempo contemplavano già metodi di arricchimento dei suoli più vantaggiosi per ottimizzare la produttività delle colture. Era già nota e attuata la concimazione, con l'utilizzo di materiali di origine sia animale che vegetale: per restituire sostanza organica ai suoli venivano utilizzati limo, fogliame, cenere e soprattutto letame (cfr. Migliavacca et al. 2020). Interessante il caso di Fondo Paviani, dove le caratteristiche di alcuni orizzonti pedologici, associati alle fasi più recenti del sito, potrebbero indicare un'attività di concimazione con residui domestici (Nicosia et al. 2011, p.290). Il dato trova confronti anche in area terramaricola sub-padana: presso il sito di Gaggio di Castelfranco Emilia (Modena) durante la fase di abbandono del villaggio appare sfruttata anche parte dello spazio intra-sito (Balista et al. 2008). Un contributo fondamentale dal punto di vista tecnologico fu l'aratro, che dovette comportare un notevole incremento della produttività e secondo alcuni (ad es. Cattani, Marchesini 2010, pp. 233-235) avrebbe inciso significativamente sull'incremento demografico durante il Bronzo Medio: l'impiego dell'energia animale, infatti, avrebbe potenziato di circa quattro volte il lavoro umano con vanga e zappa (Sherrat 1997, p. 185; Forni 1981, p. 184), e bovini di modesta taglia come quelli attestati nel contesto di indagine (cfr. De Grossi Mazzorin 2015) sebbene meno produttivi sarebbero stati particolarmente adatti al lavoro grazie ad una maggior gestibilità. Questa tecnologia potrebbe anche aver trovato particolare successo, in ambito terramaricolo, per via dello spostamento degli abitati da aree più umide e depresse a dossi di corsi fluviali relitti, caratterizzati da terreni più facilmente dissodabili (Danckers 2015, p.8; De Marinis 1997, p. 411). Tracce di aratura in Italia trovano rare testimonianze, anche perché il solco a terra non doveva necessitare di grande profondità e dunque tracce di arature protostoriche sono oggi verosimilmente erose dall'impatto della più recente agricoltura intensiva. Fondamentale per il mantenimento dei terreni destinati alle coltivazioni era anche, con buona probabilità, una programmazione efficiente dell'alternanza dei cicli colturali. Pur escludendo una parcellizzazione rigida e pianificata come quella in età etrusca o romana, è presumibile che fattori come la pendenza del terreno e la necessità di tutelare e curare le colture in maniera essenzialmente intensiva abbiano portato ad una suddivisione in appezzamenti di dimensione contenuta, coerenti con una gestione di tipo domestico, associata ad un singolo (o poco più) gruppo familiare (Debandi 2021, pp.59-60). Un'importante eccezione rispetto alla quasi inesistente documentazione sulla suddivisione agraria è il caso, proprio nell'ambito delle Valli Grandi Veronesi meridionali, di Castello del Tartaro (Cerea, VR). L'antico tessuto agrario

circostante l'insediamento è stato sottoposto negli anni a più letture teleosservative (da ultimo: Burigana, Magnini 2017); il lavoro di A. Betto (2012-2013) in particolare, nell'ambito della propria tesi di dottorato, offre una sintesi ricostruttiva, avvalorata da riscontri a terra, articolata in almeno due macro-fasi di organizzazione territoriale. Come criteri di distinzione e classificazione sono stati considerati la posizione stratigrafica relativa delle tracce (applicando allo studio teleosservativo un approccio "harrisiano"), la datazione cronostratigrafica derivata da sondaggi mirati e il *pattern* complessivo dei sistemi di canalette individuati da remoto e verificati sul campo. La fase più antica detta "a campi lunghi" è caratterizzata da lunghe tracce di canalizzazioni rettilinee e disposte in coppie¹² a delimitare lunghe fasce di terreno di larghezza compresa tra 100 e 150 m, e il cui andamento è coerente con l'antico declivio naturale del dosso, ove sorgerà in seguito l'abitato centrale. Le frequenti attestazioni, emerse in località Fazzion, di pozzetti di scarico (datati, sia in base alla tipologia della ceramica contenuta sia alle analisi radiometriche, tra il Bronzo antico 2 ed il Bronzo Medio 1) lungo tali canalette hanno suggerito l'esistenza per questa prima fase a campi aperti di un *pattern* insediativo a piccole fattorie (*jarmstead*), coerente con quanto riscontrato anche a Stanghelle (Legnago, VR; cfr. Balista 1996, Vanzetti 1997) e ricondotto ad una fase di colonizzazione pioniera, estesa sui primi ripiani terrazzati al di fuori delle aree umide¹³. Le tracce di seconda fase "a campi chiusi", più concentrate nei pressi di Castello del Tartaro e coerenti con le sue strutture cardine, derivano da una serie di canalizzazioni concentriche rispetto al sito e al fossato anulare (a sua volta alimentato dal corso in parte riescavato del fiume Tregnone). Queste componevano una sorta di reticolato intersecandosi con una serie di canalette radiali di minor entità. La cronologia di pieno BR per queste strutture risulta da alcuni frammenti ceramici inclusi nei riempimenti primari, confermando come allora il sistema idraulico fosse attivo. Il controllo a terra operato su uno dei principali nodi di derivazione idraulica, individuato mediante teleosservazione, ha reso nota la posizione stratigrafica delle canalette che da esso fuoriescono (Balista et al. 2016, pp. 310-311).

Analisi polliniche (Balista et al. 2016; Marchesini, Marvelli 2005; Balista et al. 2006) condotte su alcuni campioni di torbe prelevati nel settore di transizione all'areale di prato-pascolo hanno rivelato, per quanto riguarda le specie arboree, la presenza di piante tipicamente vegetanti su suoli umidi di margine (*Alnus*, *Salix*) in associazione a varie igrofite

¹² Con interasse nella coppia di 6-10 m

¹³ Risalente già alla fine del Bronzo Antico-inizio Bronzo Medio (cfr. Balista, Leonardi 2003).

erbacee (ciperacee, carici, giunchi); l'attività antropica è invece testimoniata possibilmente da alcuni fruttiferi (*Vitis inifera*, *Prunus*, *Castanea sativa*), ma soprattutto dalla presenza di specie cerealicole coltivate (o coltivabili) appartenenti al gruppo dell'orzo (*Hordeum*) e dell'avena-frumento (*Avena-Triticum*); abbondanti anche le graminacee spontanee, indizio di aree dedicate all'attività del pascolo (Balista et al. 2016, p.83). Tali evidenze suggeriscono la presenza, per la fase più antica, di un paesaggio agrario "misto" integrante sia attività agricole che di allevamento bovino, queste ultime attestate in particolare da un *droveway*¹⁴ centrale e altri possibili *droveway* minori; i fossati sono risultati privi di evidenze chiare di scorrimento o ristagno idrico. Per quanto riguarda la fase più recente "a campi chiusi" (*aggregated fields*), risulta più evidente l'effetto di un'organizzazione più rivolta a garantire e incrementare la produttività delle (ora più numerose) parcellizzazioni agrarie, inserite "*in un rigido sistema di connessioni a funzione agrario-idraulica, gerarchicamente organizzato in collettori principali e secondari, alimentati dal fossato perimetrale al sito e dai fossati secondari che contornano i corral e con recapito terminale sui fossati laterali del terrapieno arginale (SAM) di protezione delle aree a coltivo rispetto alle torbiere*" (Balista et al. 2016, p.85). La qui menzionata SAM, o "Strada su argine meridionale", consiste in un'evidenza di particolare interesse nell'area di indagine non solo per via della sua funzionalità a scopo agrario, ma anche in quanto eccezionale testimonianza di un sistema viario che metteva in comunicazione i due principali insediamenti (Castello del Tartaro e Fondo Paviani di primo rango nell'area terramaricola nordpadana, e che suggerisce l'esistenza di un sistema di intercomunicazione territoriale potenzialmente complesso.

2.5. Le strade, i fiumi, il mare: la mobilità nella Bassa Veronese nell'età del Bronzo

Agli inizi del secolo scorso Pigorini (1909) forniva una prima descrizione dell'organizzazione viaria interna ai siti come argini di terra sostenuti da palificate e rami intrecciati, tra i quali si sviluppavano gli spazi abitati su impalcato. Una definizione analoga venne data per le aree interne delle terramare emiliane dal suo assistente Luigi Scotti, in occasione dei lavori presso Castellazzo di Fontanellato (Leonardi 1997, p.76). Scavi *open-area* in anni più recenti a S.Rosa di Poviglio hanno rilevato una presenza di fasce libere tra le

¹⁴ Sono presenti esempi di strutture analoghe nella preistoria dell'Inghilterra meridionale (Yates 2007), di cui l'esempio canonico è quello di Fengate / Flag Fen (Pryor 2006).

abitazioni, suggerendo l'esistenza di percorsi interni all'abitato. Di ancor maggior interesse, soprattutto per la presente ricerca, sono le possibili strutture viarie negli spazi *inter-site* risparmiati dall'edificazione moderna. Un'attestazione evidente nel paesaggio fossile delle terramare e del livello di sviluppo e complessità raggiunto da questa civiltà è data infatti dalla presenza, soprattutto nel comparto settentrionale, di tracce relative ad una connettività apparentemente già ben sviluppata, che suggerisce uno stadio avanzato dell'organizzazione sul piano politico e sociale, ma anche e soprattutto economico. Parte delle infrastrutture rilevate, infatti, sono indicative di una volontà e, fino ad un certo limite, capacità di adattamento, attraverso opere per favorire la mobilità, ma anche per tutelare la produzione in un territorio solo apparentemente omogeneo e teatro di continue trasformazioni. Le prime segnalazioni di un "*nodo viario*" in posizione occidentale rispetto al sito di Castello del Tartaro risalgono agli anni '90, quando Tozzi e Harari (1990) pubblicarono il celebre volume dedicato alla teleosservazione del territorio delle valli Grandi Veronesi. Distinguendo due macro-fasi cronologiche associate a due distinte configurazioni del paesaggio fossile, venivano menzionati e illustrati, per la fase preromana, i principali insediamenti arginati allora individuati da remoto (Castello del Tartaro, Fabbrica dei Soci, Fondo Paviani), osservandone il rapporto di prossimità con i paleoalvei e ipotizzando per questi ultimi già una funzionalità come vie di comunicazione. Oltre alle "vie d'acqua" venivano prese in considerazione anche le tracce distinte di due possibili vie di terra: la "strada del Cavariolo" e soprattutto la già menzionata SAM o Strada su Argine Meridionale. Nel primo caso, benché ciò dia semplicemente prova di un uso più recente senza escluderne, dato anche l'andamento irregolare del tracciato (cfr Betto, 2013, p.16) una messa in opera in epoca protostorica, il solo elemento di datazione attualmente disponibile per l'infrastruttura sono depositi monetali risalenti all'età repubblicana¹⁵ (Gorini 1973; CAV 1990, II, 207, p. 226). Nel caso della SAM, invece, la curva del tracciato in direzione di Fondo Paviani suggerisce che la messa in opera della struttura sia coeva al periodo di vita del sito. La posizione strategica del comparto padano nordorientale dovette portare, come già accennato, allo sviluppo di una connettività non solo a livello locale, ma anche per quanto riguarda gli scambi a medio ed ampio raggio. La *polity* terramaricola delle Bassa Veronese (e in particolar modo l'insediamento arginato di

¹⁵ Il lavoro di Calzolari (1991; 1993; 2001) ha contribuito a fornire un quadro maggiormente dettagliato riguardo la presenza romana in area, sia identificando la centuriazione tra il Bastione S. Michele e il Naviglio Bussé6, sia indagando quella tra il Bussé e lo Scolo Cagliara, individuando a nord dell'infrastruttura un'area centuriata databile tra la metà del I sec. a.C. e la prima metà del I sec. d.C. (Calzolari 1993, pag. 39).

Fondo Paviani), al centro della rete di rapporti tra Europa continentale, area alpina, Italia nordoccidentale e i territori peninsulari, si aprì ad un certo punto anche ai contatti con l'Egeo e il Mediterraneo (Jones et al. 2014). Un ruolo fondamentale come via di comunicazione è quello svolto dalle antiche idrografie, e in particolare i bacini di Tartaro e Po a sud e dell'Adige a nord. Il fiume Po forniva il principale collegamento con il corridoio Adriatico, il quale costituì, nell'ultimo periodo dell'età del Bronzo, uno degli assi portanti della circolazione tra Europa e Mediterraneo (Bietti Sestieri 2003; Borgna, Càssola Guida 2009) e le trasformazioni del suo corso ebbero verosimilmente un ruolo nella ridefinizione degli assetti insediativi nel corso del Bronzo Finale. Indizi rilevanti della cosiddetta “*koinè* metallurgica” sono i materiali rinvenuti in tutta l'area padano-veneta (cfr. ad esempio, Salzani et al. 2006; Bianchin Citton 2009; Bietti Sestieri 2010; Cupitò, Leonardi 2010; Cupitò 2011). Oltre alla diffusa circolazione di manufatti bronzei, è attestata una capillare dispersione di ceramica micenea (Zerner et al. 1993; Leonard 1994; van Wijngaarden 2002; Balensi et al 2004; Laffineur, Greco 2005), e la comparsa di prime produzioni anche autoctone (Vagnetti 2010; Bettelli et al 2010; Levi 2010, pp. 201-221). La frequente associazione di questi elementi con altre classi di materiali alloigeni hanno indotto gli studiosi a prendere in considerazione il fenomeno anche come una “*koinè* tecnologica”, a cui dovettero contribuire componenti artigianali delle economie locali, ma all'interno di un più ampio e apprezzabile fenomeno su scala mediterranea (Borgna 2012, p. 292). Oltre che il metallo, uno dei materiali di maggior interesse nei processi di scambio in Europa fu senz'altro l'ambra baltica, la cui circolazione ebbe particolare importanza, durante il Bronzo Finale, nell'emergenza del centro di Frattesina come polo di riferimento e, in generale nell'intensificazione della frequentazione antropica nel Polesine (cfr. ad esempio Bellintani 1997, 2004, 2010).

2.5.1. Gestione agricola e connettività. Un esempio di infrastrutturazione “ibrida” nella Bassa Veronese: il costruito SAM

Il costruito protostorico detto SAM, acronimo di “Strada su Argine Meridionale” (Balista et al 2005), è ad oggi ancora visibile da remoto (a partire da Tozzi, Harari 1990; Calzolari 1991, 1993, 2001; Baggio et al. 1992; da ultimo: Burigana, Magnini, 2017) sottoforma di una traccia che si snoda dai pressi di Case Bellini (a sud del sito di Castello del Tartaro e a sud della Fossa Maestra) fino ai pressi del sito di Fondo Paviani. Significativo è il rapporto di questa struttura (avente una lunghezza complessiva di almeno 6,5 km e un'altezza residua compresa tra gli 1,5 e i 2 m) sia con il sistema idraulico di seconda fase a canali

concentrici (da essa delimitato a sud e ad est) che con la geomorfologia locale. Il confronto fra la SAM e un DTM¹⁶ modellato tramite interpolazione delle quote dei livelli dell'età del Bronzo (ricavate dai dati di scavo di quasi un trentennio di attività di ricerca sul campo del gruppo AMPBV e da una serie di profili pedo-stratigrafici, per cui si rimanda a Bovolato 2011-2012), ha messo in evidenza una corrispondenza del tracciato con un'isoipsa "critica" (compresa tra gli 8,25 e gli 8,5 m slm) che traccia grossomodo il limite tra un'area coltivata in posizione più rilevata e l'area meridionale morfologicamente più depressa e all'epoca fortemente soggetta ad impaludamento. Il dato suggerisce un preciso disegno progettuale, secondo cui il costruito doveva costituire un margine protettivo per i campi di Castello del Tartaro da possibili allagamenti e dall'espansione della torbiera in pieno sviluppo nell'esteso bacino umido adiacente; ciò ha indotto a pensare ad una funzione secondaria della SAM come collegamento stradale rispetto a quella apparentemente primaria di argine (Balista et al. 2016, p.87). Sulla base dei rapporti spaziali con i due abitati e dell'andamento del percorso individuato (insieme a una serie di diramazioni, per cui si rimanda a un confronto anche con Burigana, Magnini 2017) è stato proposto che la SAM possa avere avuto un primo impianto nell'area circostante maglia dei canali/canalette di Castello del Tartaro e quindi avere avuto per questa zona più una funzione di "fossato/argine", mentre nel tratto più rettilineo e prossimo a Fondo Paviani sia stata concepita maggiormente come struttura connettiva, ma forse solo in un secondo momento (Betto 2013, p.131).



Fig- 12. Veduta aerea della traccia del costruito SAM (2018, immagine trattata con algoritmo saturation stretch).

¹⁶ *Digital Terrain Model* o "Modello Digitale del Terreno"

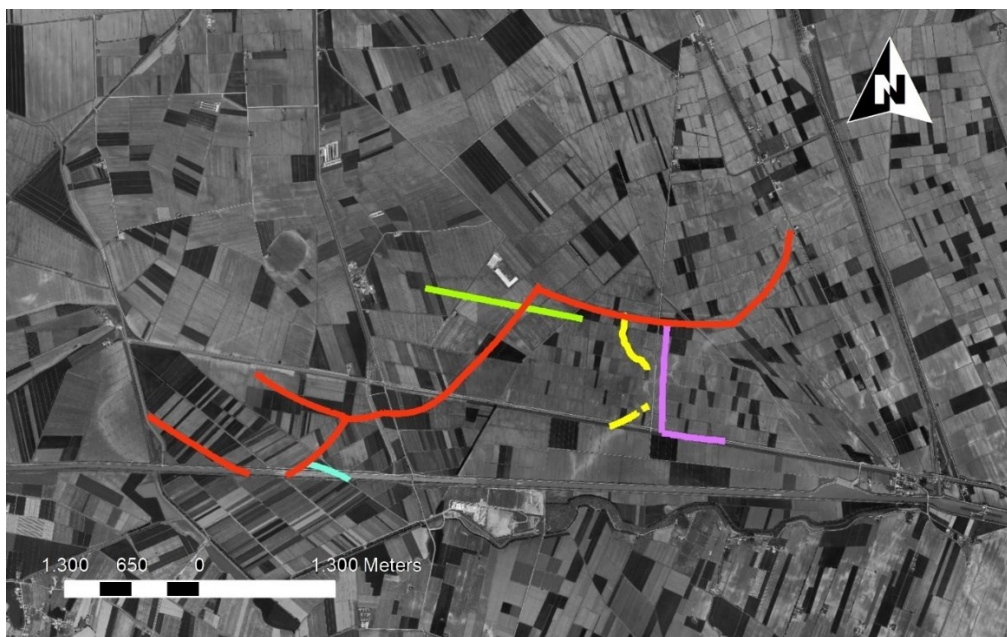


Fig. 13 Localizzazione del tracciato della SAM e delle sue possibili diramazioni individuate tramite teleosservazione.

Un approccio simulativo allo studio della SAM

In base alle considerazioni maturate dallo studio dell'infrastruttura sia attraverso teleosservazione che con indagini mirate sul campo, il gruppo di ricerca dell'AMPBV ha recentemente sviluppato in ambiente GIS una simulazione dell'impianto di irrigazione del Castello del Tartaro (di cui sono ancora rilevabili da remoto alcune flebili tracce) al fine di comprendere meglio la sua relazione con la SAM e le possibili oscillazioni della falda sotterranea. L'analisi ha comportato più fasi di elaborazione del supporto a disposizione (un DTM ad alta risoluzione – 0,5 m per pixel – fornito dal Consorzio di Bonifica Veronese) sia per la preparazione di un modello di base sia per la simulazione. Le operazioni per la creazione del modello digitale di supporto si sono concentrate principalmente sulla ricostruzione della rete irrigua e del terrapieno. A questo scopo il DTM è stato pre-trattato al fine di ricreare un ambiente più simile al paesaggio protostorico. La sfida più critica in questa fase è stata perciò quella di “filtrare” il paesaggio rimuovendo le strutture e infrastrutture moderne presenti, che avrebbero potuto compromettere la simulazione. Si è quindi proceduto nel modo seguente:

- creazione di una mappa del gradiente di pendenza in base alle quote (valori z) in ogni cella *raster* del DTM

- estrazione di tutti i valori superiori alla deviazione standard calcolata dalla mappa del gradiente di pendenza
- combinazione di tutti i valori estratti in un'unica classe (*reclassification*)
- *buffering* della *feature class* ottenuta (è stato impostato un valore di "sicurezza" di 2,5 m) per coprire qualsiasi pixel anomalo residuo
- esclusione delle feature bufferizzate dai dati originali (*clipping*)
- conversione del DTM trattato in una *multipoint feature class*
- interpolazione del file multipoint in un *Triangulated Irregular Network* (TIN)
- conversione dal TIN creato a una nuova immagine raster

La ricreazione della paleo-idrografia è stata possibile grazie al gran numero di dati archeologici e geologici raccolti sia durante il lavoro sul campo (come campioni di carote e sezioni stratigrafiche) sia durante le indagini teleosservative, che hanno aiutato a localizzare molti *cropmarks* e *soilmarks*

Il modello di rete idrografica artificiale si basa su una ricostruzione di P.Cima (2012) che mette in connessione tutte le tracce rilevate nell'area di studio attribuibili alla cosiddetta "seconda fase idraulica", coeva al sistema perimetrale dell'insediamento di Castello del Tartaro. Sono stati inoltre presi in considerazione due ulteriori fattori di complessità:

- la significativa differenziazione dimensionale delle varie componenti della rete
- la posizione di alcuni rilievi positivi arginali e spondali sia in sito che fuori sito.

Dai dati di rilevamento sul campo raccolti a partire dalla metà degli anni '80 (per una sintesi, cfr. Bovolato 2012) sono state estratte le misure di profondità e larghezza dei paleocanali e dei fossati artificiali. Sulla base di queste informazioni è stato stabilito un ordine gerarchico dimensionale (ogni classe rappresentata da un valore medio). E' stata scelta la misura dell'ampiezza dei canali come valore discriminante per la classificazione in sei ordini di grandezza:

- I ordine: il fossato dell'insediamento e il suo affluente (larghezza 45 m e profondità 2,5 m)
- II ordine: il fossato sud-est, che presumibilmente (Balista e De Guio 1997) delimitava un'area di allevamento (larghezza 7,5 m e profondità 1 m)
- III ordine: i canali laterali della SAM (larghezza 6 m e profondità 1 m)

- IV ordine: i canali laterali della cosiddetta "Big Road" (De Guio et al. 2016), che si suppone mettesse in comunicazione l'area insediativa con i pascoli vicini, perpendicolare alla SAM (larghezza 4,5 m e profondità 0,5 m)
- V ordine: i canali concentrici maggiori prossimali all'insediamento, collegati tra loro da canalette trasversali minori pertinenti ad una probabile area orticola "*near-site*" (larghezza 3,5 m e profondità 1 m)
- VI ordine: i canali minori che dovevano irrigare i terreni agricoli fuori sito in un sistema stretto a campo chiuso (larghezza 0,75 m e profondità 0,5 m).

Tre elementi morfologicamente rilevati (per i quali sono stati anche stimati approssimativamente un'altezza e una larghezza sulla base di dati rilevati sul campo) sono stati poi aggiunti al paesaggio ricostruito:

- il terrapieno del sito (larghezza 20 m e altezza 5 m)
- il *corral* sudorientale (larghezza 10 m e altezza 2,5 m)
- il terrapieno della SAM (larghezza 12 m e altezza 1 m)

Pochè l'obiettivo principale era quello di osservare come il sistema di irrigazione agricola potesse aver funzionato all'interno della macro-morfologia locale, l'analisi è stata portata avanti accettando alcune necessarie approssimazioni. Qui sono riportate le più evidenti:

- 1-Ogni vettore nel modello digitale ha un profilo a fondo piatto, a differenza dell'idrografia reale, di conseguenza la portata d'acqua è in parte sovrastimata.
- 2-Il paesaggio attuale è il risultato di ripetute azioni di ristrutturazione territoriale (la maggior parte delle quali di livellamento dei terreni a scopo agricolo), per cui la ricostruzione dei rilievi più piccoli è attualmente irrealizzabile.
- 3-Si suppone che molti dei più piccoli canali d'irrigazione non siano più rilevabili con nessun mezzo, quindi l'idrografia ricostruita può essere incompleta.

La fase successiva del lavoro è consistita in una *landform classification* (elaborazione di L.Magnini) in relazione alle caratteristiche naturali e artificiali (antropiche) del sito e del *near-site*, in cui i dati quantitativi sono stati integrati con un'interpretazione qualitativo-funzionale delle singole classi. E' stato impiegato un algoritmo di segmentazione multirisoluzione, impostando il parametro di scala a 80 per ottenere oggetti-immagine di media grandezza. Il passo successivo è stata una prima definizione macroscopica di tre principali forme di terreno: "*highlands*", "*low lands*" e "*ditches*". Il *ruleset* selezionato si basa principalmente sull'altitudine assoluta degli oggetti-immagine, ma considera anche

caratteristiche morfologiche e relazionali. Le prime strutture antropiche classificate sono state i terrapieni e la piattaforma insediativa che, oltre ad avere una quota maggiore rispetto agli altri oggetti-immagine, hanno alti valori di prossimità ai fossati. Mettendo in relazione le caratteristiche morfologiche dei terrapieni con i singoli canali è stato così possibile definire tre diverse classi. La stessa prassi operativa è stata adottata anche per classificare il terrapieno. In seguito sono state create cinque diverse classi funzionali per le infrastrutture idrauliche. Rispetto alla classificazione manuale effettuata durante lo sviluppo del DTM, si è deciso di accorpare i canali concentrici (5° ordine) e i canali distali (6° ordine) perché funzionalmente svolgono lo stesso compito. In questo caso la portata, la direzionalità e la relazione con altre strutture antropiche e naturali sono state prese in considerazione per la classificazione semi-automatica. Una volta che tutte le strutture antropiche sono state classificate, le forme di terreno rimanenti sono state riunite nelle tre classi definite come "*highlands*", "*low lands*" e "*fields*". Si è quindi proceduto, in ultima istanza, a simulare due diversi “scenari di inondazione” (con un comune aumento del livello dell'acqua di 1,5 m rispetto alla zona più depressa): il primo considerando la presenza della SAM come una diga, il secondo senza considerare la SAM. Il confronto tra le due simulazioni ha evidenziato come la presenza della SAM limiti l'area inondata nell'angolo sud-est del modello, proteggendo i campi all'interno in prossimità del sito, rimasti completamente asciutti; si nota invece come l'assenza del terrapieno avrebbe portato, in caso di divagazioni fluviali, ad una rapida inondazione di gran parte dell'area coltivata. La simulazione sperimentale sul modello ricostruttivo presentato dimostra come il massiccio argine della SAM e i suoi canali di drenaggio laterali avrebbero potuto fungere da protezione per le aree più depresse e a rischio. In definitiva, la struttura risulterebbe come l'esito di una strategia di gestione integrata del rischio e dell'incertezza, volta ad una doppia funzionalità, localmente sensibile, di connettività (strada) e di protezione del territorio (argine).

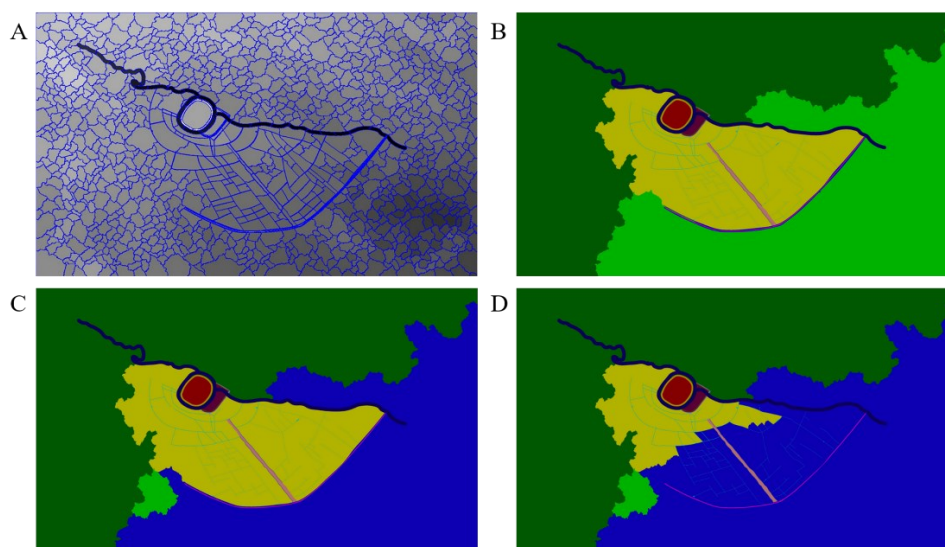


Fig. 14. Area di Castello del Tartaro (Cerea): A. Segmentazione multirisoluzione del DTM epurato; B. Classificazione semiautomatica delle strutture antropiche e delle forme del terreno; C. Simulazione di alluvione (in blu) sul modello.

2.6. Analisi di un collasso

Per una miglior comprensione del collasso delle terramare e delle diverse teorie che sono state formulate, è innanzitutto opportuno fornire una breve sintesi teorica su ciò che in letteratura si definisce, su un piano generale, con il termine “collasso”. E’ giusto tener presente che una società che raggiunge un punto di rottura, anche drammatico, sotto un determinato aspetto non necessariamente va incontro ad un crollo totale. Influenza la nostra percezione anche la scala di osservazione: lo stesso fenomeno recepito ad una certa scala di grandezza (spaziale o temporale) piuttosto che a un’altra può apparire come un caso di collasso oppure di continuità, e un approccio di tipo multidisciplinare è indispensabile per costruire solide ipotesi interpretative. In termini generali, tuttavia, il collasso è in effetti inteso come una rottura totale nel record, anzi solitamente in diversi record; ad esempio, la scomparsa di insediamenti in un’area precedentemente popolata, drastici cambiamenti climatici e ambientali, un’alterazione nelle comunicazioni e nei rapporti commerciali precedentemente stabiliti, o ancora l’interruzione dell’accesso a risorse (Kneisel et al. 2012, pp. 267-268). Nel suo celebre saggio sui fenomeni di collasso, Jared Diamond (Diamond 2005) definisce il crollo di una società come “una riduzione drastica del numero della popolazione e/o della complessità politica, economica e sociale, in un’area estesa e nel corso

di un prolungato lasso di tempo. Il fenomeno del crollo di una società è dunque la forma estrema tra vari e meno gravi tipi di decadenza, ed è arbitrario stabilire a che punto una crisi si possa definire crollo” (Diamond 2005, p 14). Fasi di ascesa e declino sono momenti riscontrabili in tutta la storia di una civiltà, così come ristrutturazioni minori nell’apparato politico e sociale, l’annessione di territori limitrofi o ancora la conquista da parte di un popolo confinante. La soglia oltre cui uno stato di crisi è percepito come un crollo, o un collasso, così come l’ampiezza della scala secondo cui osserviamo, sono dunque fattori determinanti quanto soggettivi. E’ anche per questa ragione che anche ai giorni nostri ci si interroga, per così dire, sulla direzione in cui l’uomo sta andando. Se infatti c’è chi nutre abbastanza fiducia da credere che la civiltà contemporanea, grazie alle sue avanzate competenze tecnologiche, scientifiche ed economiche abbia strumenti sufficienti per superare ostacoli un tempo insormontabili, c’è anche chi manifesta, non senza ragione, le dovute riserve. D’altra parte, la storia ci insegna che *“la civiltà può morire, perché è già morta una volta”* (Mazzarino 1988, p.174), accettando l’accezione di *civiltà* in quanto grande cultura complessa (tra i primi Melko 1969, p.8 e Flannery 1972, p.400). Nella sua analisi, Diamond si rifà anche alle considerazioni Joseph Tainter (1988), che nella sua pubblicazione sul collasso delle società complesse, elencava come tra i “sintomi” più comuni di una società indirizzata al collasso:

- Un minor livello di stratificazione o differenziazione sociale
- Una minor specializzazione individuale e/o collettiva dal punto di vista economico e produttivo
- Un controllo territoriale meno centralizzato
- Minor controllo comportamentale sia dei gruppi che degli individui
- Ridotto investimento nei cosiddetti “epifenomeni della complessità”, ovvero quegli aspetti meno vitali ma culturalmente pregnanti, come ad esempio l’arte
- Una più limitata circolazione di informazioni sia tra individui che tra entità politiche ed economiche, così come tra i centri e le periferie
- Una minor condivisione e redistribuzione delle risorse
- Coordinamento e organizzazione sia di individui che di gruppi meno efficiente
- Singole unità politiche identificabili con porzioni territoriali di minor entità (Tainter, 1988, p. 4).

In sintesi, il collasso di una civiltà è *“fondamentalmente un’improvvisa, accentuata perdita di un determinato livello di complessità sociopolitica”* (Tainter 1988, p.193). Il crollo di una

società complessa comporta un ridimensionamento sotto diversi aspetti. Si tratta di un fenomeno ricorrente nella storia umana, verificatosi a livello globale, che ha colpito società di qualunque entità. Tainter considera quattro concetti fondamentali per la comprensione del fenomeno, i primi tre alla base del quarto:

- 1- le società umane consistono di fatto in organizzazioni atte alla risoluzione di problemi;
- 2- I sistemi sociopolitici comportano una spesa energetica per il loro mantenimento;
- 3- l'aumento della complessità comporta un aumento dei costi pro capite
- 4- l'investimento nella complessità sociopolitica come risposta ai problemi comincia a dare sempre minor profitto (Tainter 1988, p.194), contestualmente ad un'alterazione sfavorevole del rapporto costi/benefici (Tainter 1988, p.205).

Sono numerose le civiltà che hanno raggiunto un rapido declino nel corso della storia. Quello che può definirsi “crollo” in senso proprio è caratterizzato, oltre che da una finestra temporale drammaticamente ridotta, da un vuoto di potere (il che consiste spesso in una delle cause scatenanti). Diversamente, ad esempio, dal declino dell'impero ottomano o bizantino (due tra i casi più iconici di quello che è comunemente definito un crollo), in cui potere e territorio sono in realtà stati progressivamente acquisiti da una differente entità, il collasso, citando ancora Tainter, *“avviene solo e soltanto in presenza di un vuoto di potere. Il collasso è possibile solo qualora non ci sia un candidato abbastanza forte da colmare il vuoto politico della disgregazione”* (Tainter 1988, p. 202). Con la disgregazione il potere centrale non è più in grado di mantenersi. Storicamente, tra le ipotesi avanzate per spiegare un simile punto di rottura per una civiltà non mancano quelle di carattere più trascendentale (si veda, in merito al caso delle Terramare, la narrativa classica delle vicende del popolo dei Pelasgi, cfr *infra*) che vedono alla base della crisi fattori mistici. Escludendo questa ipotesi, le principali cause del collasso di un popolo possono essere così sintetizzate:

- Una concatenazione casuale di eventi
- Un danno ambientale dovuto ad un ipersfruttamento del territorio, che può portare all'esaurimento o alla cessazione di una o più risorse vitali
- L'esaurimento di risorse essenziali o l'affermazione di una nuova risorsa di base
- Cambiamenti climatici che possono rendere meno efficaci o addirittura controproducenti strategie economiche e produttive ormai consolidate.
- Un evento traumatico generalizzato (epidemia, catastrofe naturale ...)
- Mutamenti significativi presso popoli alleati o comunicanti

- Il sopraggiungere di aggressori esterni
- Una contraddizione e/o disfunzione sociale (conflitto di classe, abuso delle élites...)
- Una risposta inadeguata all'insorgere dei problemi

Naturalmente non si tratta necessariamente (anzi si tratta raramente) di ragioni indipendenti e ininfluenti tra loro. Il venire a mancare di risorse essenziali, ad esempio, può dipendere sia da fattori esterni (una catastrofe naturale, un cambiamento climatico, un'interruzione dei rapporti con l'entità fornitrice) che interni al sistema (ad esempio, l'ipersfruttamento di una risorsa oltre la sua capacità rigenerativa, come nel caso del disboscamento o della salinizzazione dei suoli). Similmente, anche l'affermarsi di nuove risorse, che può coinvolgere e sconvolgere più aspetti della produzione/acquisizione e dei rapporti di scambio (con conseguenze economiche anche drammatiche), può dipendere da una novità introdotta dall'esterno oppure da un'esigenza interna di rinnovamento. Una crisi che prelude a un collasso, specialmente se una crisi economica, ha spesso a che vedere sia con cause autoctone che alloctone: un qualche fattore esterno si ripercuote sul gruppo mettendone a nudo una qualche fragilità interna. Uno stesso evento può portare a esiti estremamente diversi in base alla resistenza e alla resilienza del sistema che lo recepisce. E' per questa ragione che, nello studio di una civiltà e del suo decorso, è fondamentale avere un'idea delle condizioni ambientali, ma anche delle soluzioni produttive consolidate; delle realtà vicine e dei rapporti intrattenuti con esse, ma anche della struttura di potere interna; dell'entità del danno, ma anche del comportamento di una comunità e della sua capacità di risposta a determinati eventi e/o fattori di stress a livello sistemico.

Le criticità che emergono da aspetti intrinseci di una collettività, generalmente di carattere economico, spesso si manifestano quando il sistema è all'apice del suo ciclo, e dunque all'apice della sua complessità. Nelle società antiche l'esempio più lampante in questo senso è l'"ecocidio", o "suicidio ecologico": secondo uno schema sostanzialmente comune, in un momento di significativa crescita demografica (e dunque di incremento del fabbisogno complessivo) sono spinte ad intensificare i mezzi di produzione, lo sfruttamento delle risorse diviene quindi insostenibile per garantire una sufficiente rigenerazione. Ciò porta ad una carenza di beni primari con conseguenze critiche a livello sociale sia su piccola (crisi delle élites) che su larga scala (contrastati con altri gruppi in competizione per le risorse). I compromessi rapporti con l'esterno e il malessere locale portano a una maggior vulnerabilità, che si riflette di norma su un decremento della popolazione e infine una riduzione della

complessità economica e culturale. La reazione del gruppo sociale in ogni fase di questo processo è significativa e, nel caso delle società in rapido collasso, fatale. Il gruppo può non essere in grado di prevedere il sopraggiungere del problema in tempo; può non aver preso atto del problema, oppure averne preso atto, ma scelto di non intervenire in alcun modo; talora, invece, il gruppo cerca di risolvere un problema, ma senza successo (Diamond 2005).

Esempi di civiltà che hanno avuto ciò che nei termini descritti può definirsi un crollo sono:

- Gli Anasazi e i Cahokia, nell'attuale territorio statunitense
- I Maya in America centrale
- I Moche e i Tiwanaku in Sudamerica
- La civiltà Micenea in Grecia
- La civiltà Minoica a Creta
- Lo Zimbabwe in Africa
- Angkor Wat e le città della cultura Harappa nella valle dell'Indo
- L'isola di Pasqua nell'Oceano Pacifico
- La civiltà terramaricola in nord Italia

Il collasso delle Terramare, sebbene in scala ridotta rispetto ad altri contesti più celebri, è annoverabile tra i fenomeni locali del cosiddetto *collasso dell'età del Bronzo*. Anche tra chi non si dedica alla storia e all'archeologia questa è un'epoca nota per lo stato di crisi generalizzata che sembra aver coinvolto, nella sua frase conclusiva (tra il XIII e l'XI secolo a.C.), le più grandi civiltà del tempo. In Anatolia il regno ittita cade con la propria capitale, Hattuša, che verrà data alle fiamme e abbandonata per sempre; a Cipro i maggiori centri abitati tra cui Enkomi, Kition, e Sinda vengono abbandonati dopo più incursioni. In Siria cade Ugarit. Nel Peloponneso cade la civiltà Micenea con i suoi palazzi.

L'esistenza di una crisi nel sistema terramaricolo è tangibile, a livello sintomatico, con:

- Uno stato di violenza ricorrente, indiziato dalla strutturazione difensiva degli abitati e dai dati dalla necropoli di Olmo di Nogara (Salzani 2005; Canci 2007; Canci et al. 2009; Canci 2015) e a sua volta segno di possibile conflitto sociale e/o di frammentazione politica interna
- un rapido crollo demografico, e quindi
 - una repentina rarefazione degli abitati (con conseguente maggior isolamento degli stessi da altri nodi di intercetto e redistribuzione) e un significativo ridimensionamento di quelli residuali; questa trasformazione del tessuto

insediativo suggerisce una probabile dissoluzione della rete connettiva e della gerarchia *intra-polity*

- una drastica riduzione delle attestazioni archeologiche nell'area

Tra le cause e le condizioni precursorie a tale crisi si rilevano aspetti sia antropici che fisiografici verosimilmente influenti sulle sorti dell'area.

Un fattore critico, che potrebbe aver influenzato le condizioni economico-produttive del sistema terramaricolo, è senz'altro quello climatico. Diversi autori che si sono occupati delle dinamiche all'origine del crollo delle Terramare (De Marinis 1975; Bernabò Brea et al. 1997; Pearce 1998; Cremaschi et al. 2007; Cremaschi 2009) hanno infatti offerto un'interpretazione in questa chiave. Secondo studi recenti (Mayewski et al. 1997, Bond et al. 2001, Holzhauser et al. 2005; Magny, Richoz, 1998, Magny 2004, Baroni et al., 2006) è da individuarsi nell'attività solare la principale causa delle variazioni oloceniche nell'emisfero settentrionale. Il clima olocenico sarebbe stato caratterizzato da una sostanziale instabilità (Holzhauser et al. 2005, Menotti, 2001), in cui si sarebbero susseguite macro-fasi della durata di circa 2500-1500 anni, le ultime comprensive di più brevi (di scala secolare o decennale) periodi freschi e umidi alternati a periodi più caldi e aridi. Tali variazioni avrebbero regolato le dimensioni dei ghiacciai e i livelli lacustri (Cremaschi 2009, p.16). A partire dalla prima metà del XII secolo le condizioni climatiche in Europa e nel Mediterraneo andarono incontro a rapidi cambiamenti che ebbero verosimilmente un impatto tale su alcune società da spingere a trasformazioni sul piano storico e politico. Le effettive conseguenze del fenomeno ebbero esiti diversi in base alla latitudine e all'orografia di ogni regione. In area transalpina, ad esempio, a queste oscillazioni corrispondono a una decrescita nel livello dei laghi; le alterazioni ambientali avrebbero in tal senso favorito una nuova¹⁷ fase insediativa perilacustre intorno al 1150 a.C. (Tinner et al. 2003; Holzhauser et al. 2005). In area danubiana, nella ragione del lago Balaton (Ungheria) si assiste ad un abbandono del preesistente sistema insediativo proprio in corrispondenza di una crisi climatica, attestata dalle sequenze dendrocronologiche tra il 1159 e il 1141 a. C. (Kiss, Kulcsár 2007). Il fenomeno trova riscontro anche in area gardesana, dove la situazione nel XII secolo è analoga a quella in Svizzera a partire dal 1150 a.C. Il dato archeologico, d'altra parte, è incongruente con quanto si registra invece a Nord delle Alpi. Se durante la piena fase di Bronzo Medio avanzato si registrano effettivamente sia una contrazione del record archeologico che evidenti riasseti nel

¹⁷ A seguito di secoli di abbandono dopo gli insediamenti palafitticoli attestati all'inizio del Bronzo Medio.

sistema insediativo¹⁸, gli abitati palafitticoli gardesani appaiono tuttavia ancora occupati in questo periodo. Il loro abbandono avviene invece proprio alla fine del Bronzo Recente, in concomitanza con la fase di declino nel sistema terramaricolo, mentre durante il Bronzo Finale e la prima fase dell'età del Ferro nei laghi prealpini del settore centrale dell'Italia settentrionale non vi sono apprezzabili testimonianze di insediamenti palafitticoli simili a quelli diffusi nell'area dei laghi transalpini e nella Germania meridionale (Cardarelli 2010, p. 470). Raffaele De Marinis (2010), nelle sue più recenti analisi delle cause di collasso in pianura Padana, ha messo in forte discussione il peso del fattore climatico, partendo da un confronto con le realtà che circondano il mondo terramaricolo nel medesimo arco cronologico. L'autore pone l'accento su come il passaggio dal Bronzo Recente al Bronzo Finale abbia comportato fenomeni ed eventi assai diversi da zona a zona:

- In Italia nord-occidentale non si rilevano discontinuità nel record archeologico, al contrario è evidente un notevole grado di continuità culturale.
- Nell'area benacense, diversamente, una cesura nella documentazione archeologica è evidente, non solo per quanto riguarda la cultura materiale. I siti palafitticoli che avevano caratterizzato l'area il periodo precedente subiscono una drastica contrazione, per scomparire quasi totalmente durante l'età del Bronzo Finale.
- In Pianura Padana Settentrionale (in corrispondenza dell'area delle Grandi Valli Veronesi, dove gli insediamenti terramaricoli sono ormai pressoché scomparsi, egli osserva un'evidente frattura nella documentazione archeologica, una sostanziale discontinuità culturale e l'emergenza di un nuovo modello insediativo.
- In area terramaricola sub-padana, a sua volta, si registra un'evidente frattura e una scomparsa degli insediamenti, da cui conseguirà uno spopolamento generalizzato per tutto il Bronzo Finale.

Se la principale ragione della scomparsa delle Terramare fosse da individuare nel clima, i mutamenti climatici avrebbero, secondo De Marinis, avuto un impatto analogo sulle zone limitrofe, dove invece si nota una casistica alquanto eterogenea. Altre possibili spiegazioni, potrebbero risiedere in fenomeni migratori o comunque movimenti di popolazione. Un potenziale indizio in questo senso si troverebbe nel caso di Fossa Nera di Porcari (Lucca), dove sono state rinvenute ceramiche riferibili alla cultura terramaricola¹⁹; ciò farebbe pensare

¹⁸ Per esempio a Fiavè VI

¹⁹ Cfr. Andreotti, Zannini 1995-96, pp.300-306

che verso la fine del Bronzo Recente un gruppo proveniente dall'area emiliana abbia attraversato l'Appennino per insediarsi nella pianura a nord di Pisa il che, secondo De Marinis, non sarebbe stato un evento isolato (De Marinis 2010, pp.542-543). Diversi autori concordano nell'escludere il fattore climatico come causa unica e sufficiente per giustificare la crisi e il collasso di un sistema antropico così avanzato. Bernabò Brea e Cardarelli (1997), confrontando l'intervallo della parabola terramaricola (da 3600 a 3100 anni dal presente) con il passaggio al Subatlantico (datato generalmente tra 3000 e 2800 anni dal presente, cfr. Orombelli 1997), osservavano come quest'ultimo avrebbe avuto comunque luogo solo successivamente. Si tratta di una fase olocenica che non gode più dei massimi termici dell'optimum climatico, caratterizzata da un generale abbassamento delle temperature, che coinciderebbe con l'avanzata glaciale di Löebben (Rothlisberger 1986). Il corso del Bronzo Medio e Bronzo Recente avrebbe visto sia un periodo di freddo particolarmente intenso, corrispondente all'avanzata glaciale di Goeschenen I, che un intervallo caldo-arido a partire da circa 3200 – 3100 anni fa, in concomitanza con la crisi terramaricola. Considerando il periodo dell'Olocene nel suo complesso (cfr. Meese et al. 1994; Fisher, Koemer 2003), oscillazioni di questa intensità si sarebbero verificate in più occasioni senza dar luogo a crisi sociali (Cremaschi 2009, pp.16-17).

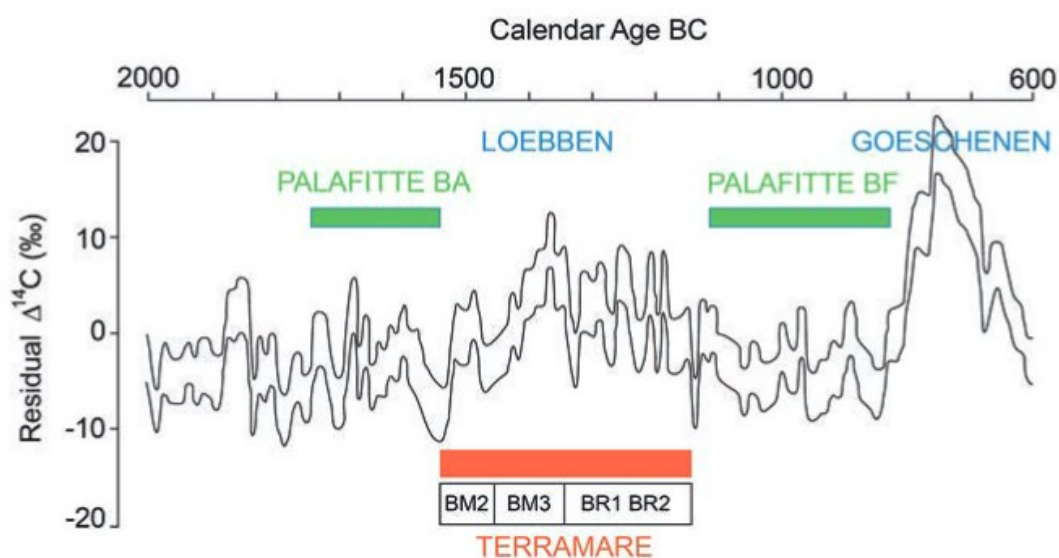


Fig.15. Comparazione tra l'arco cronologico della civiltà terramaricola e l'oscillazione climatica di Löebben (Florenzano et al. 2018).

Studi recenti sul clima nel Mediterraneo, legati sia alla modellazione che all'interpretazione dei dati palinologici (cfr. Peyron et al. 2017), sottolineano una distinzione sia tra il comparto settentrionale e quello meridionale che tra il comparto orientale e quello occidentale. Un'inversione di tendenza durante il corso dell'Olocene è stata osservata intorno al 4500 BP comportando, nel caso dell'Italia settentrionale, un generale incremento delle precipitazioni che non esclude, in ogni caso, oscillazioni di minor entità nel medesimo arco temporale. L'area del Mediterraneo orientale sarebbe invece passata da un periodo più umido ad uno più secco. Anche alla luce di questi dati, il crollo sistemico della società palaziale e l'incombere delle *Dark Ages* ha trovato, per così dire, un ridimensionamento e una "demistificazione" nella moltitudine interpretativa di concause proposte in letteratura nel corso degli anni, individuando nei mutamenti climatici, e in particolare nella siccità una ragione primaria della crisi (Kaniewski, van Campo 2017). Per quanto riguarda l'ambito terramaricolo, la mancata coincidenza di un macro-evento ambientale traumatico con il momento di collasso non esclude, in ogni caso, il potenziale effetto di un'oscillazione di minor entità su un sistema, oltretutto, possibilmente già compromesso. Supponendo che durante il Bronzo Recente fosse già in atto una crisi in termini demografici (potenzialmente associato ad una contrazione della resa colturale), non è difficile immaginare che periodi di siccità, anche limitati a pochi anni consecutivi, possano essere stati causa di seri problemi, penalizzando la produzione agricola e portando ad un inaridimento dei pascoli (Cardarelli 2010, p.271). L'ipotesi di un impatto climatico diventa inoltre più significativa se in correlata ad un contesto di ecocidio in atto, o quantomeno un ipersfruttamento del territorio che può aver causato un impoverimento di risorse, in altre parole di un danno ambientale autoindotto. Il territorio, prima solo parzialmente popolato, viene ipersfruttato per venire incontro al fabbisogno della popolazione in rapido aumento all'interno di una fitta rete insediativa. Si amplia rapidamente lo spazio degli abitati e con essi gli spazi aperti e coltivabili, e vengono adottate soluzioni di agricoltura irrigua²⁰ tecnologicamente avanzate, sia a nord (il cui caso archeologicamente più significativo è il succitato sistema di Castello del Tartaro) sia a sud del fiume Po (il caso meglio studiato è la terramara di S. Rosa di Poviglio dove, a prova di una fase climatica siccitosa, è attestato l'escavo di pozzi di crescente profondità per intercettare la falda sempre meno accessibile alle colture, cfr. Cremaschi 2007, 2009, 2017). Sia per garantire una

²⁰ l'irrigazione, oltre a fornire l'acqua necessaria al germogliare delle sementi, arricchisce il suolo di molteplici nutrienti, specialmente organici (Mercuri et al. 2006).

rotazione colturale che per sostenere la fauna allevata, inoltre, la deforestazione avrebbe di fatto non solo limitato la disponibilità di territorio ove estendere le coltivazioni ma anche, nelle fasi cronologicamente più avanzate, portato la scarsità di risorse boschive disponibili oltre una soglia critica. Oltre ai dati palinologici, supportano questo scenario gli strati superiori della terramara di S. Rosa di Poviglio (BR avanzato), dove le abitazioni scavate cessano di essere su impalcato, adottando così una tecnica costruttiva meno esigente in fatto di legname (Cremaschi 2017, p. 9).

Un altro aspetto non trascurabile, forse di più complessa lettura, è il conflitto sociale. La crisi del sistema terramaricolo si verificò dopo un periodo di crescita economica e demografica che non ha eguali in nessun altro ambito culturale dell'Italia centro-settentrionale. Secondo Cardarelli (2010) nel corso della sua storia si registrano cambiamenti che ne definiscono un carattere sociale tutt'altro che statico; tali cambiamenti sarebbero però avvenuti all'interno di un ordine ancora sostanzialmente tribale²¹, il che avrebbe posto un limite ad un'evoluzione radicale verso forme di società marcatamente differenziate. In questo contesto la crescita demografica, la minor resa dei suoli e la siccità potrebbero essere stati i principali fattori di una crisi a cui questa società non ha saputo far fronte, incapace di cambiare il proprio modello economico e sociale, oltre al proprio sistema produttivo (Cardarelli 2010, pp. 471-472). Cardarelli ritiene quindi un fattore cruciale, come chiave di lettura del collasso, la struttura sociale del mondo terramaricolo. Pratiche culturali, ad esempio, che prevedono il sacrificio rituale di membri della comunità, altrove diffuse come mezzo di controllo demografico, dovevano apparire estranee al popolo terramaricolo. Questo tipo di soluzioni trova verosimilmente un confronto in società dalla gestione fortemente centralizzata, e non all'interno di un modello sociale inclusivo come quello di tipo tribale, in cui gli individui sono tali grazie al loro senso di appartenenza alla comunità del villaggio. Questa comunità fornisce un'identità sociale che sostituisce l'affermazione del rango differenziato o dei raggruppamenti familiari emergenti (Peroni 1996, pp. 15-16; Cardarelli 1997). La conferma di un'organizzazione sociale inclusiva è percepibile dal dato relativo ad abitati e necropoli. Nel primo caso il tessuto abitativo degli insediamenti si caratterizza per un'organizzazione sistematica ed isonomica delle abitazioni. Per quanto concerne le necropoli, il grande numero di tombe presenti, che distingue questi contesti da altre realtà coeve in Italia centro-

²¹ Secondo la definizione di Cardarelli (1997, 2009) e Peroni (1996, 2004)

meridionale, suggerisce un'estensione del rituale funerario alla maggior parte degli abitanti, anche se si scorge la presenza di figure sociali, sia maschili che femminili, nettamente differenziate dal resto della comunità per la ricchezza dei corredi funerari; questo fenomeno risulta particolarmente evidente ove era praticata l'inumazione²². Il fatto che le tombe di tali personaggi fossero integrate all'interno di un'estesa necropoli comunitaria sembra, tuttavia, dimostrare che tali differenze fossero compatibili con il modello di tipo tribale, minando ben poco la coesione comunitaria (Cardarelli 2010, p.483). Gli abitanti di centri minori, abbandonati per aggregarsi ai centri più estesi, pur essendo pienamente integrati avrebbero costituito all'interno della comunità nuovi segmenti sociali appartenenti prevalentemente a classi di rango non elevato. E' questa componente della popolazione che sarebbe entrata in contrasto con le élite nel momento di crisi economica. È possibile che i gruppi dominanti abbiano tentato di trasformare il modello economico, sociale e politico per concentrare maggiormente potere e risorse economiche, con l'effetto di creare una frattura tra l'élite e il resto della comunità. Il sistema socio-economico delle Terramare era legato ad un modello fortemente coeso, all'interno del quale i rapporti tra i membri della comunità, al di là del loro rango, erano regolati dalla partecipazione al sistema e ad un'adesione collettiva ai suoi metodi di produzione, che ne garantivano la sussistenza e governavano l'ordine sociale e politico. L'impossibilità di una transizione verso un nuovo sistema produttivo e un nuovo ordine politico potrebbe aver reso il sistema terramaricolo incapace di rispondere alla crisi economico-produttiva, determinandone di conseguenza il collasso definitivo (Cardarelli 2010, p.484).

E' da considerarsi inoltre, rispetto ad una *Dark Age* post-palaziale su scala globale, il ruolo dei flussi di scambio a lunga distanza, che De Guio (2021) riferisce ad una riarticolazione nel Bronzo Finale del flusso circolatorio dell'ambra baltica parzialmente a scapito dell'area centro-alpina e in favore delle Alpi Orientali²³. Il processo avrebbe avuto inizio già alla fine del Bronzo Recente su spinta della crescente domanda di metallo del mondo post-palaziale egeo e levantino (De Guio 2021, p. 129; cfr. Iacono 2013; Broodbank 2015). In tale chiave di lettura, la crisi si inserirebbe dunque in uno stato recessivo su scala maggiore e riguardante l'intero *world-system*, in cui i tratti precursori rilevabili sono una riconfigurazione sistemica a livello politico e un'estensione senza precedenti del range di mobilità su mezzi di trasporto sia

²² Ad esempio presso la necropoli di Olmo di Nogara (per alcuni esempi rappresentativi: cfr Salzani 2005, pp.111-268 e pp. 37-110; Cupitò, Leonardi 2005, p.489)

²³ Si veda ad es. Tarvisio (cfr. Negroni, Catacchio 2015; Negroni et al. 2016)

terrestri che marittimi. Quest'ultimo aspetto trova tra i suoi fattori catalizzanti una sempre più ambiziosa imprenditoria extra-istituzionale, evidente in ambito palaziale (cfr. Broodbank 2015, p. 468), che avrebbe assecondato un'accelerazione nei processi di contaminazione culturale e tecnologica.

2.6.1. La parabola dei Pelasgi

Un confronto suggestivo con le fonti riguarda la testimonianza di Dionigi di Alicarnasso, che all'inizio del suo primo libro di Antichità Romane, narrando della situazione nella penisola italica prima della colonizzazione romana menziona i Pelasgi, popolo di origini greche²⁴, e il destino nefasto a cui essi sarebbero andati incontro. Le vicende si collocano cronologicamente due generazioni prima della guerra di Troia (intorno alla metà del XIII secolo a.C.) ma proseguirono poco oltre, sostiene Dionigi, la fine delle ostilità. Egli afferma di aver tratto le informazioni da fonti preesistenti, il che fa presupporre che gli eventi trattati si siano verificati qualche secolo prima (Cardarelli 2010, p. 473). I Pelasgi avrebbero abbandonato il Peloponneso per trasferirsi dapprima in Tessaglia, da dove sarebbero stati espulsi, e successivamente in località disperse della Grecia e dell'Egeo e in particolare a Dodona, dove l'oracolo avrebbe loro indicato di navigare in direzione delle coste italiane. Spinti dai venti meridionali ed estranei alla regione, risalendo l'Adriatico avrebbero raggiunto una delle foci del Po; lasciando in tale località le loro navi, una parte dei Pelasgi avrebbe fondato una città che prese il nome del luogo: Spina. La città, divenuta in breve tempo una potenza marittima, avrebbe prosperato al punto da poter offrire le decime al santuario di Delfi. In seguito Spina sarebbe stata attaccata da invasori, costringendo i Pelasgi ad abbandonare il luogo e spingersi nell'entroterra sino alla regione degli Umbri, confinante col popolo degli Aborigeni. Con questi ultimi, il cui territorio (e in particolare la zona di Cotilia) sarebbe stato quello indicato dalla divinazione dell'oracolo, anziché aprire un conflitto i Pelasgi avrebbero stretto un'alleanza che si sarebbe rivelata vincente nella sconfitta e conseguente cacciata dei Siculi. I Pelasgi sarebbero da identificarsi con i Tirreni, almeno secondo Ellanico di Lesbo (V sec. a.C.), che Dionigi menziona come una delle sue fonti principali; tuttavia, riferimenti topografici molto più recenti nel testo di Dionigi trapelano la "contaminazione" di altre fonti di origine latina (in particolare Varrone e Catone). Conquistata una regione fertile e

²⁴La narrazione è direttamente correlata all'idea che le popolazioni elleniche allora presenti in Italia abbiano avuto un ruolo fondamentale nella fondazione di Roma.

produttiva, avrebbero fondato rapidamente nuovi insediamenti, godendo di un periodo di enorme prosperità. Prosperità di cui non avrebbero tuttavia potuto godere a lungo: *“Ma sembrando floridi troppo per ogni parte furono sbattuti dall’ira de’ celesti, e quali ne perirono per divine calamità, quali pe’ barbari confinanti: e la parte più grande ne fu dispersa tra’ barbari, o nuovamente tra’ Greci [...] Parve alle città che la origine prima di un tale struggersi di famiglie fosse la siccità che intristiva la terra, talché non restava frutto alcuno fino al maturarsi negli arbori; ma innanzi tempo cadevano, nè i semi che sbucciavano in germi, vegetavano finché le spighe floride si empissero nei tempi naturali, nè bastavano i pascoli alle greggie. Non più le fonti eran atte a toglier la sete, guaste, impicciolate o spente dagli estivi calori. Consentivano con ciò le vicende delle bestie e delle donne nel generare: e quale sconciavasi in aborti, e quale dava figli, morenti nel parto, o fatali nell’utero ancora alle madri. Se scampavano i pericoli del parto, mutili, o storpi, o manchevoli per altro disagio, non eran’utili, onde si allevassero. L’altra moltitudine poi, specialmente la più vegeta era colta da mali, e da morti frequenti più dell’usato. E consultando l’oracolo per quale violazione di geni o di Numi questo patissero, e per quali pratiche mai fosse da sperare una calma in tanti orrori, udirono ciò essere perchè esauditi nei loro desiderj, non aveano penduto quanto promisero, ma dovevano ancora agli Dei cose preziosissime. Imperocché li Pelasghi ridotti a penuria di ogni cosa nelle loro terre, si votarono a Giove, ad Apollo, ed ai Cabiri di santificare ad essi le decime di ogni prodotto. Appagati nella preghiera presero ed offerirono agli Dei parte delle messi e de’ frutti”* (Dionigi XIV, tradotto in Mastrofini 1823, pp. 36-37). *“Ascoltato l’oracolo non sapevano interpretarlo. Fra dubbj loro un più vecchio, raccogliendone i sensi, disse che erravano affatto, se credevano che gli Dei li punissero a torto: volere il diritto ed il giusto, che si desse loro la primizia di tutto: nondimeno aspettavano ancora parte della generazione degli uomini, cosa più che tutte ad essi accettissima: se avessero questa, l’oracolo sarebbe adempito. Parve ad altri che costui parlasse rettamente, ad altri che tendesse delle insidie. E proponendo un tale che s’interrogasse il Dio se gradiva che si facessero per lui le decime, ancora degli uomini; mandarono i sacri vati per questo, e rispose che si facessero. Quand’ecco sedizione fra loro sul modo di decimarsi: e prima surse a vicenda tra’ capi della città; poi l’altra moltitudine prese i suoi magistrati in sospetto: nè già sollevavansi con regola alcuna, ma come per entusiasmo e per divino furore. Così molte case furono abbandonate, trasmigrandosi parte di essi, nè sostenendo gli attenenti di essere abbandonati dai loro carissimi, e restarsene tra i*

più crudi nemici. Primi questi levandosi dall' Italia errarono per la Grecia, e molto tra' barbari: quindi ancor altri incorsero ne' mali medesimi, continuandosi ogni anno la decima. Nè i magistrati la sospendevano, ma sceglievano le primizie de' giovani più robusti pe' Numi, quantunque nel proposito di soddisfare agli Dei, temessero i moti di chi usciva a sorte per vittima. Erano ancora non pochi espulsi dagli avversarj per inimicizia, tutto che sotto specie di oneste cagioni Laonde spessissime furono la partenze; e la gente Pelasga errò dispersa in più terre.” (Dionigi XV, tradotto in Mastrofini 1823, pp. 38-39). La fonte principale a cui Dionigi afferma di utilizzare in queste righe è Mirsilio di Metimne (III sec. a.c.). Secondo la narrazione, dunque, i Pelasgi avrebbero colonizzato un vasto territorio e prosperato sino a quando, per mancata offerta in sacrifici umani alla divinità, sarebbero stati colpiti da una pesante siccità, con conseguenze sulla produzione alimentare, sulla salute e sulla sopravvivenza della popolazione (in particolare su quella infantile e sui nascituri) e anche sul sistema sociale. Maggiormente interessante nella vicenda riportata non è tanto né la ricerca di una conferma storica né la complessa interazione tra mito e fonti storiche, bensì la struttura del racconto e la consequenzialità degli eventi, e un processo che al di là della sua veridicità dovette comunque risultare plausibile e fondato a Dionigi e ai suoi contemporanei: la fine di un popolo determinata non da un singolo evento catastrofico, ma piuttosto da una concatenazione di fattori ambientali, economici, sociali e politici che si combinano in un processo di dissoluzione (Cardarelli 2010, p.479). Come confronto con l'esodo pelagico narrato dagli autori antichi, possibili segnali di una “diaspora terramaricola” sono stati individuati in alcune evidenze della cultura materiale, e in particolare la distribuzione di materiali ceramici e metallici (ma anche di altre classi di materiali meno studiate, come ad esempio l'osso-corno). Tali presenze sembrano suggerire una certa frequenza negli scambi e nella mobilità già nel corso del Bronzo Recente I e sono state interpretate (Frontini 2011) come una possibile premessa “interculturale” alla migrazione, che avrebbe successivamente agevolato fenomeni complessi di accettazione. Al di là di una mancata concordanza tra gli studiosi nella misura in cui le comunità nordpadane avrebbero preso parte a tale diaspora, si osserva anche per l'area settentrionale un'innegabile riduzione del numero di attestazioni archeologiche, che evidenzia un forte calo insediativo e porta a supporre che, anche qui, parte della popolazione si sia trasferita altrove (Frontini 2011, p.196).

3. Introduzione alla metodologia: l'*Agent-Based Modeling*

3.1. Modelli e scienze sociali: un percorso immersivo nello studio della complessità

Per un'adeguata introduzione al metodo di analisi studiato e sperimentato nella presente ricerca, l'*Agent-Based Modeling*, è opportuno innanzitutto definirlo nella propria essenza, e dunque chiarire che cosa s'intende per "modello". I modelli sono strumenti che mettono in relazione dati rilevati, di natura sia quantitativa che qualitativa, e idee teoriche. Possono servire come dispositivi euristici per la manipolazione di osservazioni e ipotesi, ma possono trovare applicazione anche come sistemi di visualizzazione, mezzi per analisi comparative, strutture gestionali e organizzative, o ancora come strumenti esplicativi o dispositivi per la

costruzione e lo sviluppo di teorie (Harvey, 1969, p. 141). Una mappa, ad esempio, mostra una rappresentazione idealizzata di uno specifico elemento e della sua distribuzione sulla proiezione semplificata di una superficie cartografica; un sistema di classificazione può permettere di identificare e selezionare, tramite algoritmi “rozzamente” predittivi, determinati attributi-chiave; un'equazione matematica, in altri casi, può rappresentare l'interdipendenza di variabili selezionate all'interno di un contesto reale. Si tratta di rappresentazioni idealizzate di osservazioni; sono strutturati, sono selettivi, semplificano in base a uno o più specifici campi d'interesse e possono offrire un quadro predittivo relativamente accurato (Clarke 2014, p.2). I modelli, secondo tale accezione, fanno quindi parte innanzitutto del nostro strumentario cognitivo. Le nostre stesse opinioni, i nostri approcci, obiettivi e progettualità sono in gran parte condizionati da modelli mentali subconsci che accumuliamo nel tempo. L'interpretazione delle osservazioni deriva sempre da modelli concettuali che, per dare fondamento alle nostre ipotesi, dovrebbero essere esplicitati e resi verificabili. La costruzione, il collaudo, la verifica o la confutazione e la modifica di modelli è l'essenza dell'approccio empirico-scientifico, in quanto costituisce un ciclo progressivo (osservazioni, ipotesi, esperimenti, conclusioni, nuove ipotesi, nuove osservazioni...) in cui nuove informazioni e intuizioni vanno ad arricchire e raffinare la teoria. L'esistenza di un modello, del resto, presuppone l'esistenza di una teoria, poiché il primo non è che un'espressione semplificata (formalizzata) ed essenziale della seconda che - tacitamente o esplicitamente - viene sviluppata per una particolare situazione. La produzione e lo studio di modelli possono servire, in sintesi, ad articolare teorie latenti in forma palpabile e spesso assai potente (Harvey 1969 pp.146-7) in quanto:

- 1) sono già, inevitabilmente, una procedura (coscientemente o inconscientemente) utilizzata
- 2) sono economici: ci permettono di trasmettere e scambiare informazioni generalizzate, ma in forma “compressa”, portando alla scoperta di informazioni nuove e stimolando lo sviluppo di teorie generali (Haggett 1965, p. 23).

Formalizzazione, comprensione, previsione e apprendimento sono, in sintesi, le principali ragioni della modellazione (Epstein 2008; Gilbert, Troitzsch 2009, p. 4).

Un tipo di modelli che ha trovato e continua a trovare sempre maggiore impiego in archeologia e, più in generale, nelle scienze sociali è quello di tipo simulativo. Una simulazione può costituire un vero e proprio esperimento ripetibile per comprendere fenomeni, e in cui possiamo selezionare e controllare i fattori e i parametri più determinanti,

può quindi fornire un vero e proprio *asset* di ragionamento. Se la storia è un processo che si ripete un'unica volta, all'interno di una simulazione virtuale i fenomeni del passato possono essere ripetuti, osservati e manipolati infinite volte; possiamo simulare, grazie all'informatica, ciò che sappiamo di scenari e azioni trascorse sperimentando i diversi effetti che possono manifestarsi all'interno di un ambiente virtuale. Il ruolo del programmatore consiste anche nel valutare quali sono le condizioni catalizzanti per tali effetti, che incrementano cioè la loro probabilità di verificarsi. Le attività integrate in un modello dovrebbero essere definite in quanto disposizioni sociali o capacità all'interno di un sistema di soggetti, intenzioni, attività, azioni e operazioni (alcune razionali, altre indeterminate o inconsce). Una certa azione sociale A, nelle circostanze T, ha una probabilità P di causare un cambiamento Y in qualche entità N (agente sociale o comunità di agenti o la natura stessa). Tale impatto costituisce la proprietà dell'azione sociale A (Barceló 2009). L'implementazione in una macchina di tali causalità o potenzialità per spiegare un fenomeno può essere considerata la sostanza della simulazione al computer di un processo causale (Edmonds e Moss 2011; Epstein 2006; Macy, Willer 2002; Sokolowski, Banks 2009; Zacharias et al. 2008). Questo modo di intendere la causalità storica induce l'analisi a prestare attenzione al flusso delle attività in corso, per concentrarsi sullo svolgersi di attività reali in una reale cornice storica (Barceló 2012, p.8). Sono stati individuati (Troitzsch 1997, riprendendo in parte Ostrom 1988) almeno due tipi di percorso che hanno portato allo sviluppo della simulazione informatica nelle scienze sociali. Da un lato si segue il "solco", come percorso scientifico, già tracciato dalla modellazione matematica, quest'ultima grossomodo limitata al trattamento numerico di vari tipi di equazioni differenziali²⁵. Dall'altro lato, i modelli simulativi informatici trovano una loro origine anche come strumento di manipolazione in sé, come mezzo operante, cioè, grazie al linguaggio di programmazione del computer e indipendentemente dal trattamento numerico. Pur non mancando anche in tempi non così recenti esempi (cfr. Abelson, Bernstein 1963; Abelson, Carroll 1965) degni di nota di questo approccio, è negli ultimi anni, con la disponibilità di interfacce grafiche, che l'espressione di teorie verbali per creare una simulazione informatizzata è diventata un'operazione decisamente più facile: non solo i risultati possono essere visualizzati, ma anche la specificazione del modello può essere fatta destreggiandosi tra elementi grafici ed espressioni, combinati in un linguaggio più naturale e di conseguenza più intuitivo. In questa forma la specificazione del modello può inoltre prescindere dagli oneri

²⁵ Che pure, al giorno d'oggi, si avvale tendenzialmente dell'ausilio informatico per il calcolo.

gestionali necessari all'esecuzione in una determinata piattaforma, ne sono esempio proprio la modellazione multilivello e la modellazione di intelligenza artificiale distribuita (in altre parole multi-agente). I primi sviluppi significativi nella scienza sociale computazionale risalgono alla seconda metà del XX secolo, quando studiosi delle scienze sociali iniziarono ad usare i computer per condurre analisi statistiche dei propri dati (erano i primi tempi di SPSS, SAS, e dei lavori con schede perforate). Tra i pionieri e fondatori dell'orientamento teorico nella scienza sociale computazionale si annoverano Herbert A. Simon (1982), Karl W. Deutsch, Harold Guetzkow e Thomas C. Schelling (di cui merita particolare menzione il *Segregation Model*, cfr. Schelling 1971). Nasceva così un tipo di indagine integrata e interdisciplinare, il cui paradigma ha una duplice fondamento: sostanziale (come prospettiva teorica) e strumentale (come approccio metodologico). La prima elaborazione delle informazioni e l'orientamento cibernetico si basa su precedenti fondazioni di Ross Ashby, Norbert Wiener, Claude Shannon e Ludwig von Bertalanffy. La ricerca di quest'ultimo in particolare si è concentrata sullo studio di nuovi metodi nella scienza sociale computazionale, a cui si devono i più importanti sviluppi che hanno portato alla messa a punto del nostro metodo d'indagine.

Le principali strategie computazionali delle scienze sociali oggi in uso possono essere classificate in cinque aree, ciascuna articolata in specifiche branche:

- Estrazione automatica di informazioni
- Analisi delle reti sociali (SNA)
- Analisi geospaziale (socio-GIS o GIS sociale)
- Modellazione della complessità
- Modelli di simulazione sociali

Le ultime in particolar modo comprendono una varietà di metodi, di cui fanno parte dinamiche di sistema, modelli microanalitici, *query* di accodamento, automi cellulari (*Cellular Automata* o CA), modelli multi-agente (*Multi Agent Models*, MA) e modelli evolutivi e di apprendimento (*Machine Learning*). Sono comuni anche diverse ibridazioni tra i cinque metodi e, trattandosi di un campo di ricerca relativamente recente, altre sinergie attendono ancora di essere sperimentate. Tra i tipi più recenti e salienti dei modelli simulativi, in termini di potenziale a livello interdisciplinare nelle scienze sociali, sono le dinamiche dei sistemi (*System Dynamics*) e i modelli basati sugli agenti (Agent-Based Models o ABM, appunto); la compenetrazione di queste due metodologie è un esempio molto comune di

modellazione ibrida nelle scienze sociali (Cioffi-Revilla 2010). I modelli di dinamica dei sistemi sono modelli di simulazione continua che impiegano relazioni ipotetiche tra attività e processi. La dinamica dei sistemi è stata sviluppata da Forester nel 1961 ed è stata inizialmente applicata per affrontare la complessità dei sistemi economici industriali e i problemi ambientali e demografici su scala globale. Sono strettamente legati all'approccio generale dei sistemi e permettono ai modellatori di inserire relazioni qualitative. Essi prevedono, su un piano teorico, l'assemblamento di componenti interrelate come cicli di feedback che rispondono alle condizioni del sistema e forniscono un grado di auto-correzione e controllo (Olson 2018). Gli *Agent Based Models* sono tipicamente indirizzati ad esplicitare, attraverso un modello, l'emergenza di comportamenti collettivi su larga scala generati dal comportamento individuale di attori (agenti) indipendenti. Alleanze, norme, agitazioni pubbliche, sviluppo di sfere di influenza, reti internazionali o transnazionali, distribuzioni in sistemi regionali o globali e altre forme di comportamento collettivo sono esempi di fenomeni emergenti prodotti da attori individuali, che costituiscono questioni di interesse centrale per le scienze sociali (Cioffi-Revilla 2010) e per l'archeologia in particolare, dove sono aspetti di primario interesse sia i sistemi sociali che i loro effetti a lungo termine. Joshua Epstein, nell'introduzione dell'iconico "*Growing Artificial Societies*" (Epstein, Axtell 1996, p. 1), menziona Herbert Simon (1981) il quale, in controtendenza con il paradigma tuttora diffuso, amava affermare che le cosiddette "*hard sciences*" fossero, in realtà, proprio quelle umane, poiché non sono ordinatamente scomponibili (malgrado non siano mancati i tentativi nel tempo) in sottoprocessi distinti (economico, demografico, culturale, spaziale, sono etichette di fatto individuate deliberatamente per ragioni di studio). Analizzando separatamente tali aspetti è impossibile conseguire un'adeguata analisi del processo sociale complessivo. Non esiste una metodologia "naturale" e ordinata per studiare questi processi mentre si evolvono nel loro insieme. Le scienze sociali sono difficili, anche perché la sperimentazione è difficile. E' difficile testare le ipotesi riguardanti la relazione tra i comportamenti individuali e le dinamiche macroscopiche, e comprendere come, se gli individui si comportano in questo e quel modo, sorgano determinati fenomeni collettivi. L'ABM può costituire in tal senso un prezioso supporto poiché, con questo approccio, strutture sociali di base e comportamenti di gruppo emergono dall'interazione di individui che operano autonomamente, in ambienti artificiali, secondo regole limitate alle proprie capacità informative e computazionali. Le "società artificiali" fungono quindi da laboratori virtuali dove strutture sociali vengono

modellate e indagate con lo scopo di individuare meccanismi microscopici (o locali) necessari e sufficienti a generare le macro-strutture di interesse. Tipicamente, tali esperimenti al computer coinvolgono tre elementi fondamentali:

- un insieme di attori o, appunto, agenti
- un insieme di regole di interazione
- un ambiente con caratteristiche che possono essere statiche o dinamiche, organizzative e/o spaziali.

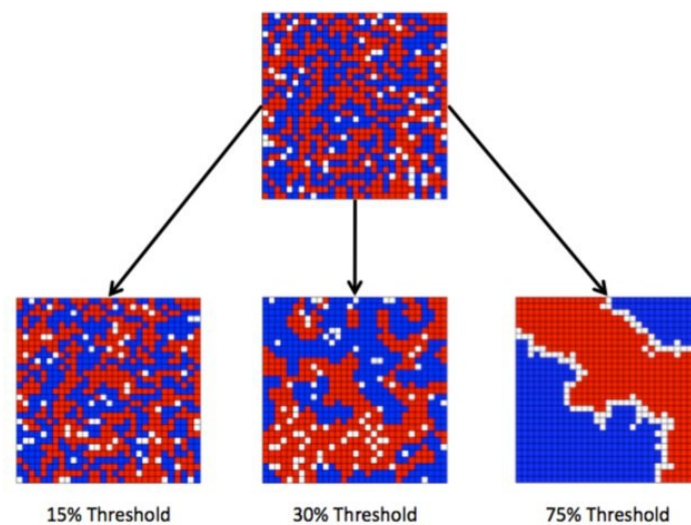


Fig. 16. Esempio di visualizzazione del “modello di segregazione” di Schelling (1971)

3.2. Agenti, ambiente, regole: entità e funzionalità in un modello attoriale

3.2.1. Gli agenti

Per via del corso di sviluppo dei modelli agenziali, oltre che per via della loro stessa concezione (incentrata nel ruolo svolto dall'unità attoriale), sono maturate nel corso del tempo diverse accezioni e definizioni del termine “agente”. Buona parte di queste consiste in un'elencazione di aspetti: Drogoul e Ferber (1999), ad esempio, descrivono l'agente in un modello come un'entità virtuale con nove diverse caratteristiche, che vanno dalla capacità di comunicare, interagire e riprodursi, al possesso di abilità e risorse. Wooldridge e Jennings (1995) parlano di autonomia, abilità sociale, reattività e proattività come proprietà critiche di un agente. Parker et al. (2003) li considerano entità autonome che condividono un ambiente attraverso la comunicazione e l'interazione. Gilbert (2008, p.5) definisce gli agenti nei modelli

di simulazione come *"...sia programmi per computer separati o, più comunemente, parti distinte di un programma usate per rappresentare attori sociali - persone individuali, organizzazioni come le aziende, o enti come gli stati nazionali. Sono programmati per reagire all'ambiente computazionale in cui si trovano, laddove questo ambiente è un modello dell'ambiente reale in cui operano gli attori sociali"*. Secondo Epstein (1996, p. 2) *"gli agenti sono il "popolo" delle società artificiali. Ogni agente ha stati interni e regole di comportamento. Alcuni stati sono fissi durante la vita dell'agente, mentre altri cambiano attraverso l'interazione con altri agenti o con l'ambiente esterno"*. Miller (2009) considera gli agenti semplicemente unità indipendenti che cercano di soddisfare una serie di obiettivi. In questa accezione, essi possono rappresentare un'ampia casistica di entità individuali: stati, proprietari terrieri, residenti, affittuari, agricoltori, acquirenti, veicoli o anche persone che escono per una passeggiata. Jim Doran, intervistato nel 2018 dall'ex allievo David Hales (Hales, Doran 2018), ricorda di aver utilizzato il termine "agente computazionale" per la prima volta nel 1985 nel suo contributo al volume di Gilbert and Heath (1985), dandone anche la sua attuale definizione; *"[...] qualsiasi locus di processo decisionale o comportamento umano all'interno di un processo computazionale. Se ce n'è più di uno, allora abbiamo un sistema multi-agente"*. Temi ricorrenti in queste definizioni, che possiamo considerare come gli aspetti essenziali di questa entità, sono l'autonomia e la capacità di interazione. Tale interazione ha luogo sia tra due o più agenti, sia tra agenti e ambiente.

3.2.2. L'ambiente

L'ambiente di una società artificiale è la "scena" in cui si svolgono le attività, in cui s'intrecciano relazioni, in cui, in sostanza, ha luogo la vita delle società artificiali. Gilbert (2008, p.6) ne dà una definizione essenziale come *"il mondo in cui gli agenti interagiscono"*. Questa descrizione pone poche restrizioni su ciò che si qualifica come ambiente in ABM. Un'idea immediata di ambiente che possiamo immaginare è ad esempio un paesaggio, una topografia di risorse rinnovabili che gli agenti, in qualche modo, elaborano, assumono e metabolizzano. Un simile scenario può essere costituito da un reticolo di località, in cui sono presenti risorse in qualche modo accessibili agli agenti. L'ambiente in ABM, in realtà, consiste in ben più di uno sfondo per le attività degli individui: esso costituisce, a sua volta, anche un'entità indipendente con cui gli agenti interagiscono ed eventualmente creano delle

relazioni. In una simile chiave di lettura è possibile concepire l'entità ambientale in modo anche molto più astratto, ad esempio una rete di comunicazione, la cui stessa geometria di connessioni può mutare nel tempo (Epstein, 1996, p.5). L'ambiente in questi modelli è spesso concepito come un network o meglio come un grafo, nel quale ai nodi corrispondono gli agenti, e le loro relazioni possono venire rappresentate sottoforma di collegamenti (archi) tra di essi (Riolo, Cohen, Axelrod 2001). Gli ambienti possono quindi rappresentare anche spazi sociali o strutture di circolazione e diffusione, ad esempio, di determinate conoscenze come le innovazioni agricole, che possono manifestarsi come cambiamenti nella copertura del suolo (Gilbert, Pyka, & Ahrweiler 2001). Un caso particolare di concezione “non spaziale” in questo senso è ad esempio *PatronWorld* (Graham 2009, 2015), in cui è simulata la vita sociale in età romana con l'intento di indagare fenomeni come disordini civili e manifestazioni di violenza, e di dimostrare come “[...] *le purghe e le proscrizioni spontanee e le circostanze in cui si generano possono essere modellate*” (Graham 2009, 1.0).

Agenti nello spazio

La concezione di ambiente, anche rimanendo esclusivamente nell'ambito della disciplina archeologica, è dunque eterogenea; un caso tra i più frequenti, data probabilmente anche la natura dei dati più abbondanti di cui normalmente dispongono gli archeologi, è quello dei modelli agenziali di tipo spaziale (*Spatial Agent-Based Models* o SABM). Negli SABM lo spazio è una componente esplicita nel sistema, e gli effetti dati da relazioni di prossimità geografica ne influenzano andamento e comportamento (Manson et al. 2020). Il livello di dettaglio con cui viene rappresentato l'ambiente geografico (così come, del resto, il livello di dettaglio dell'interazione agente-ambiente) può variare notevolmente a seconda dei casi (Stanilov 2012). In molti modelli spaziali, l'ambiente è codificato digitalmente come una griglia dove le celle e i loro vicini possono avere valori che influenzano il comportamento sia degli individui che lo occupano, che sono tipicamente definiti topologicamente da coordinate x e y, sia dell'ambiente stesso. Il grado di dettaglio e accuratezza con cui lo spazio è reso esplicito negli SABM ha un impatto significativo sulle prestazioni del modello (cfr. Ajelli et al. 2010, Brown et al. 2005) e sulla misura del suo realismo anche nel comportamento interattivo con gli agenti (Barnaud et al. 2013). Gli ABM spaziali espliciti e realistici permettono spesso di analizzare relazioni dirette tra gli agenti e una serie di caratteristiche ambientali (Stanilov 2012, p.253), anche per questa ragione si riscontra una casistica

abbondante in questo tipo di rappresentazioni (cfr. Filatova 2015 per i modelli economici, Wallentin 2017 per quelli ecologici e Manson et al. 2020 per una panoramica generale). Gli SABM possono utilizzare anche nozioni spaziali non esplicite, o anche non geografiche. L'iniziale attenzione per questa metodologia, al contrario, era stata in principio rivolta soprattutto all'implementazione degli agenti e ai processi inter-agenziali, e in minor misura ad una definizione realistica e dettagliata dell'ambiente geografico. Lo spazio può infatti essere esplicitamente rappresentato, ma astratto nella sua rappresentazione della realtà. Ne sono un ormai storico esempio i primi lavori di Tobler (1975) sulle geografie cellulari e i modelli di segregazione (Hegselmann et al. 2017; Sakoda 1971; Schelling 1971). Il celebre *Sugarscape* (Epstein, Axtell 1996, cfr *infra*) utilizzava a sua volta una griglia bidimensionale e agenti mobili con coordinate x/y (Manson et al. 2020, p.25).

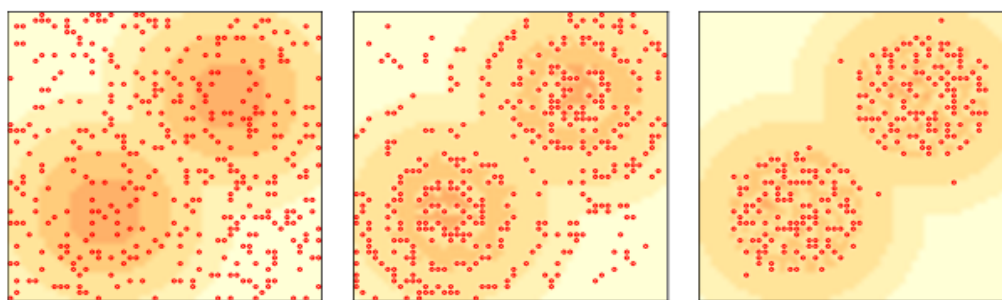


Fig. 16.

Fig. 17. Una versione dello *Sugarscape* di Epstein e Axtell (1996)

I modelli succitati sono ritenuti “fondamentali” per aver precorso in tempi e offerto un riferimento a chi si è occupato di ABM (e prima ancora di CA, cfr *infra*) in numerosi ambiti applicativi, anche perché indirizzati a problematiche di carattere universale a partire da regole essenziali. In molte discipline che si avvalgono di questo tipo di strumenti, tuttavia, e tra queste senz'altro anche l'archeologia, spesso l'interesse è rivolto all'analisi di un preciso caso di studio, associato ad un altrettanto preciso contesto spaziale. Diviene pertanto necessaria un'integrazione con dati specifici, per poter produrre risultati direttamente applicabili al reale ambito geografico di studio (e a tutte le informazioni necessarie alla sua definizione) e fare un uso produttivo del modello. In questi casi, in cui non è possibile confinare l'oggetto del nostro esperimento tra le mura di un laboratorio, si rende necessario trovare soluzioni efficaci per poter integrare i dati geografici. I sistemi informativi geografici (GIS²⁶) hanno trovato attenzione nel panorama scientifico a partire dalla metà degli anni '70 per divenire, dalla metà

²⁶ *Geographical Information System*

degli anni '90, uno strumento irrinunciabile per coloro che si occupano, trasversalmente, di gestione del territorio²⁷. Ora infatti è possibile avvalersi di ambienti interattivi che consentono di manipolare e interrogare in forma limitata, ma diretta l'insieme dei dati accorpati in sempre più sofisticati *database*; è possibile ricavare informazioni sulle condizioni del paesaggio, integrando dati di varia natura: carte storiche, fotografie ottiche e digitali da piattaforme aeree, immagini satellitari acquisite tramite diversi tipi di sensore, reti di comunicazione e altre fonti che possono fornire una ricca documentazione delle condizioni storiche e attuali di un contesto. Se l'idea di poter osservare e monitorare, anche da parte di operatori non esperti, lo stato di uno o (solitamente) più elementi del paesaggio è ormai diffusamente assimilata e sfruttata, comprendere il funzionamento del paesaggio nell'interazione complessa delle sue componenti è tuttavia a lungo rimasto, e forse rimane tutt'oggi, appannaggio dei gestori del territorio (Westerwelt, 2002, p.83). L'Agent-Based Modeling, d'altra parte, tipicamente impiegato per la simulazione di scenari in cui una moltitudine di individui popola un paesaggio, permette di simulare l'interazione tra questi due elementi (che, volendo semplificare, sono riconducibili ad agenti e ambiente) secondo regole relativamente semplici. È stato quindi un naturale sviluppo della metodologia quello di modellare secondo ricostruzioni realistiche di un ambiente specifico, i cui parametri caratterizzanti sono agevolmente acquisibili proprio attraverso un sistema informativo geografico. In molti casi il paesaggio è stato rappresentato come un oggetto statico, o una sorta di "palcoscenico" in cui far operare gli agenti (ad es. Briggs et al. 1996, Girnblett et al. 1996, Remm 1998). In altri casi (ad es. Dean et al. 1998 e Kohler et al. 1996), un'approssimazione di paesaggio dinamico è stata incorporata nella simulazione in modalità del tutto esogena rispetto alla popolazione di agenti, applicando condizioni dinamiche lette dal *record* storico come "riproducendo un nastro" di condizioni a cui la popolazione reagisce nel tempo (Box 2002, p.59). In altri casi ancora, la metodologia è stata impiegata per modellare processi dinamici del paesaggio come la vita e lo sviluppo delle foreste (come *Arborgames*, cfr. Savage, Askenazi 2000). In questi modelli l'oggetto della simulazione è il paesaggio stesso, ma non è contemplata la presenza di agenti in senso stretto. Miller (2009), nella sua definizione di ABM, considera gli agenti come unità indipendenti che cercano di soddisfare una serie di obiettivi, e ritiene preferibile esplorare i sistemi in funzione alle loro caratteristiche o alle loro regole comportamentali piuttosto che all'aggregazione di strutture ambientali o l'emergenza di mappe. In questo senso

²⁷ Per una più estesa trattazione della storia dei sistemi informativi geografici si rimanda a Foresman (1998)

il contraltare è rappresentato dai precursori, per molti aspetti, degli ABM, i già menzionati *Cellular Automata* o CA, modelli discreti, originariamente solo teorici, e ora impiegati in numerose discipline. Sono considerabili come "*sistemi dinamici spazio-temporali discreti basati su regole locali*" (Miller 2009, p.408), la cui componente elementare sono le *celle*, unità in grado di memorizzare uno o più stati²⁸ propri (Batty 2000, p.96) e che sono tipicamente disposte all'interno di una griglia²⁹. In effetti, esempi di simulazioni che combinino la dinamicità degli agenti con la dinamicità del paesaggio sono state per lungo tempo abbastanza rare. Una ragione, tuttora da tenere in considerazione, è senz'altro nell'essenza stessa dei modelli, e dunque la necessaria limitazione del sistema ai suoi requisiti essenziali. Se l'obiettivo è, ad esempio, studiare le interazioni di gruppo di popolazioni che non altereranno significativamente il loro ambiente, l'aggiunta di componenti ambientali dinamici non farebbe che rendere la simulazione inutilmente complessa: l'economia è un requisito fondamentale per una spiegazione efficace di un fenomeno³⁰. Un altro probabile motivo di tale carenza è di carattere più strettamente tecnologico. Pur essendoci stato il desiderio anche in passato di integrare le funzionalità di *Cellular Automata* basati su GIS con quelle dei modelli basati su agenti, i software disponibili inizialmente impiegati per questi tipi di analisi erano specificamente dedicati e progettati per l'uno o l'altro paradigma di programmazione (Box, 2002, pp.60-61), benché le due tipologie siano accomunate da analoghi presupposti (Clarke 2014, p.1230). Già intorno agli anni 2000, comunque, con l'intento di superare questo ostacolo, sono stati intrapresi diversi percorsi di ricerca che hanno portato alla messa a punto di applicazioni e linguaggi più versatili da un lato, e a riflessioni epistemologiche più aperte ad un'integrazione dall'altro. Alcuni (Neutens et al. 2007; Andersson et al. 2006) hanno tentato di collegare l'ABM con altre strutture teoriche; Bithell et al. (2008, p. 625) vedono nell'ABM il potenziale per creare modelli integrati disciplinarmente trasversali, in modo da potenziare il processo di ricerca spaziale; Clifford (2008, p. 675) ha osservato come l'utilizzo di ABM risulti più appropriato quando le decisioni o le azioni sono distribuite in luoghi specifici e dove la struttura è emergente dall'interazione tra gli individui.

²⁸ Nel caso più semplice, ogni cella può avere stati binari (con valori 1 o 0). In simulazioni più complesse, tuttavia, le celle possono avere stati diversi espressi in range più ampi di valori.

²⁹ Ma non necessariamente (cfr. O'Sullivan 2001; Shi, Pang 2000)

³⁰ Si veda, in tal senso, l'approccio dicotomico "*kiss or kids*" (cfr *infra*)

3.2.3. Le regole

La terza componente fondamentale in un Agent-Based Model sono le regole, che determinano il comportamento delle proprie entità e formalizzano la relazione sia tra agenti, che tra agenti e ambiente, che dell'ambiente con se stesso. Possiamo trarre un esempio significativo dal “modello fondamentale” (Manson et al. 2020, 2.5) *Sugarscape* (Epstein, Axtell 1996):

- una regola come: “Guarda in giro il più possibile, trova il luogo più ricco di cibo, vacci e consuma il cibo” è una regola di tipo agente-ambiente
- una regola che incrementa o decrementa il tasso di crescita di risorse locali dipendentemente dallo stato del suo intorno³¹, secondo il meccanismo degli automi cellulari, è una regola di tipo ambiente-ambiente
- regole di accoppiamento, combattimento, scambio o altre regole che descrivono un comportamento tra attori sociali³² sono regole di tipo agente-agente

Le regole di un modello vengono applicate all'interno dei processi che descrivono il comportamento degli agenti e le condizioni a cui questi comportamenti si verificano. Ad essi può essere richiesto di intraprendere azioni o prendere autonomamente decisioni in risposta ad una oppure molteplici condizioni. Quando sono presi in considerazione criteri multipli, il processo decisionale può essere guidato da “funzioni di utilità”, che attribuiscono un peso ai fattori condizionanti in base a cui gli agenti classificano le loro opzioni per scegliere quale comportamento assumere. I criteri applicati in tali classificazioni tengono di norma conto sia della teoria che della ricerca empirica pertinente le problematiche affrontate dalla simulazione; trattandosi di applicazioni rivolte spesso alle scienze sociali, le regole decisionali incorporate attingono in molti casi dai campi dell'economia, delle scienze cognitive e delle neuroscienze. Strutturare il processo decisionale all'interno di un ABM comporta spesso il far fronte a delle lacune, nei dati o anche nella teoria. I ricercatori potrebbero non avere una forte giustificazione sul piano concettuale, e scegliere una regola eventualmente all'interno di una gamma già sperimentata con risultati notoriamente ragionevoli (Auchincloss, Totaro-Garcia 2015). Un'altra soluzione per gestire l'incertezza (riguardo una determinata funzione o

³¹ Le celle spaziali confinanti.

³² Per attore sociale s'intende qui colui che esercita l'azione sociale secondo l'accezione di Max Weber (Weber 1922, ed.1995): un'azione che assume un significato non solo per il soggetto che la compie ma anche per altri soggetti appartenenti alla medesima collettività.

equazione, oppure sui parametri al suo interno) è quello di integrare l'aleatorietà come componente processuale. Ne è un esempio applicativo il principio della razionalità limitata (Herbert 1991; Clem 1996), un aspetto in molti casi irrinunciabile nella scrittura di un ABM, il cui concetto di base si fonda sull'idea che il processo decisionale, anche all'interno di un modello, non può essere del tutto razionale in quanto un agente non è onnisciente e dunque non ha né tutte le informazioni possibili, né una visione completa del sistema a cui appartiene. La parzialità delle conoscenze da parte degli agenti è uno degli aspetti che può rendere difficile la progettazione di un sistema artificiale, così come una molteplicità di bisogni e desideri talora contrastanti. Un paradigma classico per formalizzare l'architettura interna di agenti complessi è il paradigma *BDI* o "*Belief-Desire-Intention*" (Bratman 1987), che considera e aggiorna non solo la conoscenza "interna" e relativa (*belief*) che l'agente ha del proprio mondo, ma anche i suoi desideri (*desire*), ovvero gli obiettivi che intende conseguire, e le sue intenzioni (*intention*), ovvero le azioni che intende compiere (Caillou et al. 2015). Un altro paradigma, o per meglio dire un monito riguardante l'implementazione di regole all'interno dei modelli è quello che si rifà al principio "*less is more*"³³: l'approccio *KISS*, ovvero "*Keep It Simple, Stupid!*" (Axelrod 1984), è una delle linee guida fondamentali nella simulazione di sistemi sociali e si basa sul concetto che, per rappresentare la realtà in un modello, non è necessario definirla con l'impiego di norme altrettanto complesse. I più conosciuti modelli agenziali, come il modello di segregazione di Schelling, sono tipicamente astratti e definiti da un numero molto limitato di regole. Tale semplicità associata alla mancanza di un supporto empirico, tuttavia, hanno fatto sì che questa tipologia di ABM venisse talora etichettata come puramente ludica e percepita come adatta a scopi unicamente "*proof-of-concepts*"³⁴ (Crooks et al. 2008; Janssen e Ostrom 2006). Di tendenza opposta è invece la categoria di modelli cosiddetti "fotografici" in quanto iperdescrittivi della realtà (cfr. Parker et al. 2003; Parker, Filatova 2008), i quali ovviamente si affidano in larga parte a dati empirici e offrono alti livelli di dettaglio (Balbi et al. 2013). Questa tipologia di modelli dall'approccio "anti-dogmatico" detto *KIDS* (*Keep It Descriptive, Stupid*) (cfr. da ultimo Edmonds, Meyer 2017) ha guadagnato crescente popolarità, soprattutto nell'applicazione a studi relativi ai mutamenti nell'uso e nella copertura dei suoli (Sun et al. 2016, p.58), pur comportando regole tendenzialmente più complicate e richiedendo talora grandi quantità di

³³ Letteralmente: "di meno è di più", frase attribuita all'architetto Ludwig Mies Van Der Rohe.

³⁴ Ovvero utili esclusivamente alla dimostrazione di concetti astratti e universali

dati. Il loro successo, tuttavia, è una prova della versatilità dell'*Agent Based Modeling* come metodologia, non solo per testare concetti astratti ma anche per affrontare problemi del mondo reale. Le scienze archeologiche costituiscono, in questo senso, un caso particolarmente interessante in quanto l'apparato teorico, per essere solido, necessita di un supporto di dati concreti, i quali in molti casi non sono disponibili in quantità sufficiente da derivarne un'ipotesi senza conoscenze pregresse di carattere più generico. Comprendere un contesto archeologico in assenza di dati è impossibile, ma è altrettanto impossibile senza tener conto di quanto sappiamo sull'uomo e i suoi tratti più essenziali. Una sfida per gli archeologi che operano in Agent Based Modeling, pertanto, è sicuramente quella di trovare un giusto equilibrio tra queste due tendenze.

3.3. Netlogo

Diversamente da altre tipologie di modelli (ad esempio modelli più “tradizionali” basati su equazioni differenziali che richiedono essenzialmente competenze statistico-matematiche) i modelli agenziali, sviluppati all'interno di software più o meno strettamente dedicati, necessitano anche di competenze informatiche per la loro implementazione, oltre che per il *testing* e l'analisi dei dati in output. E' importante uno studio pregresso e un certo grado di confidenza con il software utilizzato, soprattutto una buona conoscenza del suo linguaggio di programmazione, la cui scelta influenza il *concept* del modello. Se è vero che un linguaggio informatico non pone di per sé limiti al grado di complessità o all'entità di un modello, è bene ricordare, in fase di sviluppo, che il livello di complessità del macro-processo logico comporta uno sforzo proporzionale per la parametrizzazione, per la validazione e anche in fase di ultima analisi. Lo sviluppo di un ABM avviene pertanto secondo una metodologia specifica in cui sono coinvolte tutte le sue componenti basilari: entità, variabili e processi. Molti dei software a disposizione per lo sviluppo di ABM hanno una licenza di tipo GPL³⁵, e i loro promotori spesso mettono in condivisione e in circolazione i modelli sviluppati (sia da se stessi che da altri utenti) per chiunque sia interessato. Ciò non solo favorisce, come in tutti i campi di ricerca, la diffusione delle conoscenze e l'arricchimento del dibattito scientifico, ma

³⁵ La licenza GPL (*General Public License*) o GNU GPL è la licenza più comunemente utilizzata per l'*open source*. La licenza è stata scritta da Richard Stallman della Free Software Foundation (per ulteriori informazioni: <https://fsfe.org>) e prevede che un software, secondo le linee-guida del progetto, sia scaricabile, eseguibile, modificabile, redistribuibile gratuitamente e illimitatamente sia in originale che modificato.

rende anche comprensibili e più facilmente prevedibili le potenzialità realizzative e informative del modello.

SOFTWARE	LINGUAGGIO	GIS	3D
Netlogo	Netlogo	SI	SI
Repast	JAVA, Python, Visual Basic, C++, C#	SI	SI
ABLE (Agent Building and Learning Environment)	ABL – Able Rule Language (linguaggio specifico sviluppato per il software)	NO	NO
Altrevia Adaptive Modeler	regole decisionali preimpostate	NO	NO
Anylogic	JAVA; UML-RT	SI	SI
AOR Simulations	JAVA	Previsto	Previsto
Brahms	Brahms language	SI	SI
Cormas	Smalltalk (richiede VisualWorks per funzionare)	SI	NO
ECJ	JAVA	NO	NO
Flame	C e XML, funziona su singoli PC e su sistemi HPC	SI	SI
Framesticks	FramScript (linguaggio creato ad hoc per il software)	SI	SI
SeSam	Programmazione Visuale	SI	SI
MadKit	JAVA, C, C++	NO	NO
MASS	FABLES (Functional Agent-based Language for Simulations); JAVA; (Netlogo; Repast)	NO	SI
SimAgent	Pop-11 . Linguaggio sviluppato ad-hoc per il software	NO	NO
JSoar	Soar 1 à5 (in Lisp) Soar 6 in linguaggio C; Java; C++	NO	SI
Swarm	Java, C object.oriented	NO	SI
GAMA	GAML	SI	SI
Pandora/Cassandra	C++	SI	SI
OpenSim	C#	SI	SI

Tab. 1. Una sintesi delle principali piattaforme informatiche impiegate per lo sviluppo di Agent-Based Models (Pal et al. 2020).

NetLogo, frutto del lavoro di Uri Wilensky a partire dal 1999 e tuttora in continuo sviluppo e aggiornamento presso il Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling (CCL)³⁶, è attualmente uno dei più popolari ambienti di modellazione e programmazione per l'ABM, e dunque la simulazione e lo studio di fenomeni complessi sia naturali che sociali.

³⁶ Il CCL è un gruppo di ricerca a cui fa capo il Prof. Wilensky. È stato fondato nel 1995 presso la Tufts University e trasferito alla Northwestern University nel 2000. Il centro comprende personale e studiosi da tutto il mondo: ricercatori nel campo dell'istruzione, sviluppatori e programmatori, ingegneri informatici e costruttori di modelli (<https://ccl.northwestern.edu/>, ultimo accesso: 29/08/2021).

NetLogo è anche un linguaggio appartenente alla nuova generazione di linguaggi di modellazione multi-agente, di cui fanno parte anche StarLogo e StarLogoT. Funziona su Java Virtual Machine, quindi è utilizzabile su tutte le principali piattaforme (Mac, Windows, Linux e altri). Il software è eseguibile come un'applicazione desktop e supporta anche il funzionamento mediante stringa di comandi. E' corredato da un'ampia documentazione, sia online che accessibile dal software, e di tutorial. Dal menu principale è accessibile una *Models Library*, una vasta raccolta di simulazioni già scritte e (in buona parte) testate, che possono essere dunque già utilizzate, copiate, integrate e modificate; sono inoltre editi manuali più o meno ufficiali, a partire da Wilenski, Rand (2015). I contenuti e i campi di applicazione sinora studiati grazie all'utilizzo di questa piattaforma sono molteplici e appartengono sia alle scienze naturali che sociali, tra cui biologia e medicina, fisica e chimica, matematica e informatica, economia e psicologia sociale. Netlogo è uno strumento versatile³⁷ e avanzato al punto da offrire varie e importanti potenzialità di applicazioni, ma è allo stesso tempo anche abbastanza semplice. Il linguaggio "umanizzato", particolarmente intuitivo e per questo accessibile ad un ampio bacino di utenza, lo rende un ottimo mezzo creativo, analitico e didattico per studenti e insegnanti. Tra gli aspetti positivi di Netlogo, la scelta di sviluppare uno strumento di facile comprensione e utilizzo consente, dal punto di vista tecnico, di pianificare più facilmente il processo logico e valutare a priori le potenzialità realizzative del modello. Ciò agevola anche la condivisione delle idee alla base del modello: già in fase progettuale è possibile coinvolgere e confrontarsi anche con studiosi o esperti non programmatori, prefigurando loro uno scenario e delle dinamiche a cui possano contribuire con le loro idee e competenze. Un altro vantaggio riguarda il grande quantitativo di esempi editi disponibili: un software non solo *user-friendly*, ma anche *open-source* è logicamente utilizzato da un maggior numero di utenti, che a loro volta possono estrapolare e aggiustare porzioni di codice, o anche semplicemente trarre ispirazione per lo sviluppo di un nuovo modello. Il sito ufficiale³⁸ offre un'ampia varietà di esempi sia ad opera dei gestori del software, sia di utenti a cui è dedicato uno spazio per caricare e mettere in condivisione il proprio lavoro. Esistono anche librerie esterne molto vaste da cui è possibile attingere a titolo gratuito, tra cui due molto ricche sono Modelling Commons (<http://modelingcommons.org>) e soprattutto Comses (<https://www.comses.net/>). Secondo i propri sviluppatori, NetLogo è

³⁷ Sono inoltre attualmente disponibili 20 estensioni.

³⁸ <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/community/>, ultimo accesso 31/08/2021

particolarmente adatto alla modellazione di sistemi complessi che evolvono nel tempo: i codificatori possono dare istruzioni a centinaia o migliaia di agenti che operano tutti in modo indipendente. Ciò consente, secondo i principali obiettivi di un ABM, di esplorare la connessione tra il comportamento a livello micro degli individui e gli schemi di livello macro che emergono dalla loro interazione. In Netlogo sono contemplate quattro tipologie di agenti:

- le “tartarughe” (*turtles*), che costituiscono le unità attive dell’ambiente,
- i *link*, che rappresentano i rapporti tra due turtle
- le *patch*, ovvero le celle spaziali
- l'osservatore (*observer*), ovvero l’utente che impartisce istruzioni agli altri agenti e monitora le variabili del sistema.

Le tartarughe sono agenti a coordinate variabili, che dunque si muovono nel mondo. Il mondo è bidimensionale³⁹, partizionato in patch secondo una griglia regolare di dimensioni definite dall’osservatore. Le patch hanno coordinate fisse all’interno di un piano cartesiano, non hanno quindi mobilità, ma si comportano sostanzialmente con le stesse facoltà interattive delle turtle. Le regole all’interno del modello sono espresse sottoforma di procedure classificate come *commands* e *reporters*, che impartiscono agli agenti comandi e valori di riferimento e, di fatto, li istruiscono a determinati azioni e comportamenti. Un comando costituisce un’azione che un agente deve eseguire, con conseguente effetto, ed esordisce generalmente con un verbo (ad es. “*create*”, “*clear*”, “*die*”). Con *reporter* si definisce invece un’istruzione di calcolo di un determinato valore, che l’agente poi “riferisce” (in inglese: “*report*”, per l’appunto) all’agente da cui proviene l’interrogazione; sono per lo più espresse mediante nomi o locuzioni nominali. Netlogo dispone di una serie di comandi di base già incorporati, elencati all’interno di un dizionario accessibile online. Comandi e reporter incorporati in NetLogo sono chiamati primitive (*primitives*), mentre quando sono descritti e definiti da chi scrive il codice si parla di *procedures*. Molti comandi e reporter elaborano valori di input in base all’istruzione che viene impartita. Per quanto riguarda le variabili, queste sono categorizzate in Netlogo in variabili locali e variabili agenziali. Nel primo caso si utilizzano solo nel contesto di una particolare procedura o parte di una procedura, dalla cui durata dipende l’esistenza stessa della variabile. Nel secondo caso sono valori in memoria associati agli agenti che appartengono al sistema; può trattarsi di variabili globali (considerabili in un certo senso “variabili-osservatore”), in cui è rappresentato un unico valore

³⁹ E’ disponibile, tuttavia, la modalità di visualizzazione 3D

a cui ogni agente può accedere, oppure di variabili che riguardano i singoli individui (variabili-turtle, variabili-patch e variabili-link) in cui ogni agente ha un certo valore. Come nel caso delle procedure, esistono variabili già integrate in Netlogo, come ad esempio le dimensioni, il colore o le coordinate, che ne definiscono la posizione nello spazio cartesiano.

3.4. Comunicare un ABM: il protocollo ODD

La crescente diffusione di ABM, impiegati in una gamma di campi di ricerca sempre più vasto, ne ha messo senz'altro in luce varie potenzialità nell'analisi di aspetti (come variabilità tra individui, interazioni locali, cicli vitali completi e in particolare, naturalmente, il comportamento individuale in quanto risposta adattiva ad un ambiente mutevole e interattivo) che sono solitamente trascurati, ad esempio, nei modelli analitici. L'ampliarsi della casistica applicativa ha tuttavia messo in luce anche delle criticità, che dipendono in parte anche dalla necessità di un computer per l'implementazione ed esecuzione; l'applicabilità esclusiva per mezzo di strumenti informatici rende gli ABM più complessi non solo sotto l'aspetto analitico, ma anche della comprensione e soprattutto della comunicazione (Grimm 1999; Grimm et al. 2006, p.116) sia del metodo (ancora poco conosciuto) sia dei risultati prodotti. Diversamente dai modelli analitici, di facile comunicazione in quanto formulati in un linguaggio condiviso (quello della matematica), le pubblicazioni che presentano ABM possono essere di difficile leggibilità, ambigue e spesso difettare di informazioni rilevanti. Ciò comporta una minore accessibilità e di conseguenza una più difficoltosa riproducibilità di questa tipologia di esperimenti (Hales et al. 2003). E' questa la principale ragione per cui un gruppo di studiosi specializzati nell'impiego di ABM in diverse discipline ha voluto definire un protocollo standard per la pubblicazione di questi modelli, con l'intento di combinare due elementi essenziali:

- una struttura descrittiva generale ovvero, di fatto, un modello descrittivo indipendente dalla sua struttura specifica, dal suo scopo e dalla sua forma di attuazione (Grimm, 2002)
- il linguaggio matematico,

discernendo così con chiarezza le considerazioni verbali da una descrizione matematica delle equazioni, regole e schemi che costituiscono il modello. L'idea di base del protocollo ODD

(*Overview, Design Concept and Details*⁴⁰) è stata proposta da Grimm e Railsback (2005) e discussa nel 2004 durante un workshop internazionale a Bergen (Norvegia) a cui presero parte 28 utilizzatori di ABM provenienti da diversi paesi e diversi ambiti disciplinari. Lo scopo della messa a punto del protocollo ODD è strutturare le informazioni relative ad un ABM all'interno del medesimo schema, il quale consiste in sette elementi (scopo, variabili di stato e scale, panoramica e programmazione del processo, concetti di design, inizializzazione, input, sottomodelli), accorpati nelle tre macro-categorie da cui deriva l'acronimo: panoramica, concetti di design e dettagli.

3.4.1. *Overview* (panoramica)

Di un modello è innanzitutto essenziale specificare lo scopo, in quanto motiva la scelta da parte del programmatore di includere o meno determinati aspetti della realtà. La specificazione delle variabili di stato, che all'interno di un sistema dinamico regolano la relazione tra i dati in input e quelli in output, è di priorità immediatamente successiva, in quanto aiuta a comprendere la struttura del sistema, che tipo di entità sono rappresentate e perché. Altrettanto importante è dichiarare la risoluzione spaziale, temporale, e l'estensione del sistema all'interno del modello mediante la definizione delle scale. Il passo successivo, fondamentale per comprendere appieno un ABM, è fornire una panoramica concisa (in questa fase in forma verbale) dei processi integrati (come produzione, consumo ecc.); è inoltre opportuno specificare l'ordine di esecuzione (programmazione) di tali processi, che influisce anche sulle modalità di aggiornamento delle variabili di stato. La panoramica e la programmazione dei processi sono tipicamente rappresentate per mezzo di un diagramma di flusso, il quale deve riprodurre fedelmente il flusso processuale dell'ABM per renderlo effettivamente re-implementabile; una forma di rappresentazione alternativa è la stesura di uno pseudo-codice descrittivo (cfr, ad esempio, Pitt et al. 2003).

3.4.2. *Design concept* (caratteristiche)

I *design concept* costituiscono la sezione del protocollo descrittivo che fornisce un quadro esplicito per la progettazione, comunicazione e riproduzione di un ABM. Le tematiche

⁴⁰ “*Panoramica, concetti di design e dettagli*”. La denominazione originale proposta da Grimm e Railsback (2005), PSPC+3, era riferita alle iniziali dei primi quattro elementi del protocollo (scopo, struttura, processo, concetti) e ai restanti tre elementi (cfr *infra*). Poiché nel protocollo rivisto alcuni elementi hanno subito una ridenominazione si è deciso di scegliere un nuovo acronimo (Grimm et al. 2006, p.117).

pertinenti a questa sezione, non tutte necessariamente rappresentate in un ABM, possono essere così riassunte:

- Emergenza

le dinamiche del sistema e dei suoi agenti emergono in modo relativamente complesso e imprevedibile. Domande-chiave che dovrebbero trovare risposta in questa sezione sono: quali fenomeni emergono a livello di sistema? In che modalità si verificano tali fenomeni, da quali comportamenti adattivi degli agenti e da quali caratteristiche del loro ambiente? Quali altri comportamenti e dinamiche sono invece forzati dalle impostazioni del modello? (Railsback, Grimm 2019, p.103).

- Adattamento:

in questa sezione del protocollo vengono definiti i tratti adattivi degli individui (agenti) nel modello, e la loro risposta a cambiamenti in loro stessi o nell'ambiente con cui interagiscono.

- Adeguatezza (*fitness*):

l'adeguatezza a determinate circostanze e condizioni può costituire o meno un obiettivo per un agente. Le modalità con cui i vari agenti commensurano la loro adeguatezza sono a loro volta un aspetto che varia in base al modello formulato, per garantirne la riproducibilità è pertanto necessario esplicitare questi aspetti.

- Previsione:

Una caratteristica degli ABM è che gli individui che fanno parte del modello possono fare delle stime delle conseguenze delle loro azioni e regolare il loro comportamento di conseguenza. In questa sezione viene descritto come fanno gli individui a prevedere le condizioni future che sperimenteranno.

- Percezione:

Per interagire tra di loro e con l'ambiente gli agenti devono essere in grado di percepire ciò che li circonda. E' pertanto necessario definire quali sono le variabili di stato, sia interne che ambientali, che si presume siano note, recepite e prese in considerazione dagli agenti nelle loro decisioni adattive.

- Interazione:

si specifica in questa sezione del protocollo ODD uno degli aspetti-chiave della modellazione basata su agenti, ovvero l'interazione. Con il termine s'intendono in questo contesto tutte le forme di influenza reciproca, sia tra agenti che tra agenti e ambiente, determinate dalle scelte specifiche dello sviluppatore del modello.

- Stocasticità

l'aspetto della stocasticità è spesso una parte significativa integrante il modello, va pertanto indicato se è prevista o meno e, se sì, quali sono i processi e le variabili aleatorie coinvolte e per quale ragione lo sono.

- Collettivi

I collettivi, all'interno di un ABM, sono gruppi di individui raggruppati per via di un determinato attributo, obiettivo o condizione in comune. Nelle scienze umanistiche l'esempio più tipico di collettivo è quello che s'identifica con una classe sociale.

- Osservazione

Il concetto di osservazione riguarda il modo in cui raccogliamo e analizziamo le informazioni da un ABM per studiare un certo scenario secondo un approccio scientifico. Dagli ABM, così come dai sistemi (complessi) che rappresentano, scaturiscono molti tipi di dinamiche, e ciò che impariamo da esse dipende da come le osserviamo loro. Una parte fondamentale della progettazione e della codifica di un modello è la scelta del tipo di risultati che si otterranno e come andranno osservati (Railsback, Grimm 2019, p.119; Grimm et al. 2006, p. 119).

3.4.3. *Details* (dettagli)

La terza e ultima macro-sezione del protocollo ODD è destinata all'approfondimento di alcuni aspetti cruciali della concezione e formulazione del modello: per renderlo riproducibile e permettere di verificare i suoi risultati, dobbiamo innanzitutto dichiarare le sue condizioni iniziali: nella sotto-sezione definita "inizializzazione" viene precisato come è stato impostato il modello all'inizio della simulazione. Vanno in tale contesto specificati la caratterizzazione dell'ambiente e degli agenti all'"istante 0", i valori iniziali delle variabili di stato, se l'inizializzazione è sempre la stessa oppure varia da un ciclo all'altro della simulazione, se i valori scelti sono arbitrari, casuali o basati su dati precisi. Queste scelte hanno a che fare con l'intento del ricercatore: possiamo ad esempio desiderare che i risultati della simulazione dipendano dalle sue condizioni iniziali (magari per capire la risposta del sistema a qualche nuova situazione) oppure, in altri casi, preferire risultati indipendenti resettando la memoria all'inizio di ogni ciclo. Con dati di input, altra sottosezione della descrizione in dettaglio, ci si riferisce non ai valori dei parametri di base o ai dati di inizializzazione, ma piuttosto a

variabili che definiscono condizioni ambientali⁴¹ (come temperatura, prezzo di mercato ecc.) che mutano nello spazio e nel tempo e che influenzano le dinamiche della simulazione. Il modello fornisce determinati dati in output come risposta a tali impostazioni. E' dunque necessario descrivere quali dati di input vengono utilizzati, come vengono utilizzati e come sono stati generati oppure ottenuti. In ultima istanza, viene fornita una presentazione e caratterizzazione in dettaglio di tutti i sottomodelli rappresentanti i processi secondari (già introdotti nella panoramica di processo), compresa la parametrizzazione del modello. L'ampiezza di questa sezione conclusiva può variare sensibilmente in base al livello di complessità dell'esperimento; quando lo spazio della pubblicazione non consente una descrizione troppo estesa, è possibile la stesura di uno "scheletro" in linguaggio essenzialmente matematico, costituito da regole espresse sottoforma di equazioni e parametri visualizzabili sottoforma di tabelle. In una seconda versione più completa e discorsiva viene riportato accuratamente, in accompagnamento a ciascuna formula o database, una nota verbale in dettaglio in cui sia spiegato, ad esempio, quali assunzioni specifiche sono alla base della scelta, quali fattori sono stati decisivi nella determinazione dei valori di riferimento, o ancora in che modo sono stati calibrati sottomodelli. Per garantire una maggior chiarezza, secondo quanto suggerito dagli stessi promotori del protocollo ODD, l'ideale è presentare quando possibile entrambe le versioni in modo da rendere un'idea generale di più rapido impatto e allo stesso tempo dare modo di approfondire laddove la comprensione è meno immediata⁴² (Grimm et al. 2006, p. 119).

L'ODD è attualmente il protocollo più utilizzato soprattutto dagli ecologisti, ma il suo uso è in aumento anche in altre scienze (Vincenot 2018) e in particolare nelle scienze sociali (Hauke et al. 2017). La natura non tecnica dell'ODD facilita questa tipologia di sviluppo: i modellisti possono seguire lo schema ODD anziché dover creare un proprio formato di documentazione e incorrendo nei rischi del caso. Inoltre, con la diffusione dell'ODD all'interno di ogni comunità scientifica, più lettori, inclusi revisori ed editori, potranno trarre vantaggio dalla standardizzazione (Grimm et al. 2020). Alcuni anni fa è stato proposto da Müller et al. (2013) di effettuare ulteriori specificazioni nel protocollo ODD sotto alcuni aspetti, come le entità, le

⁴¹ Per variabili ambientali si intende, in questo contesto, variabili relative non necessariamente all'ambiente geografico e naturale, ma anche ad un'ambiente economico o sociale (si veda, ad esempio, Graham 2009, cfr. *supra*).

⁴² Una possibilità (cfr. ad esempio Born, Deutschman 1997) è operare una stesura del duplice documento in html, offrendo la possibilità al lettore di visualizzare la versione sintetica ed eventualmente accedere tramite link agli approfondimenti di ogni punto elencato.

variabili di stato e parametri di base, per venire maggiormente incontro alle esigenze dei modelli di tipo socio-ecologico. Il protocollo ODD+D (la D aggiuntiva sta per “*Decision*”), è un’integrazione di quanto proposto da Grimm et al. (2006) con l’intento di facilitare una descrizione chiara e completa degli ABM in modo standardizzato, con particolare riguardo alle decisioni umane (*decision making*) e includendo sia gli aspetti empirici che i fondamenti teorici per la scelta del modello decisionale (Müller et al. 2013, p.4). Sono stati utilizzati anche standard del tutto differenti e linguaggi alternativi per la comunicazione di modelli agenziali, soprattutto per comunicare modelli simulativi di eventi discreti (*discrete event simulation*, cfr. Monks et al. 2019; Wilkinson et al. 2016) per i quali il protocollo ODD sembra meno efficace. E’ stato d’altra parte osservato (Müller et al. 2014) come nessuna singola soluzione descrittiva possa soddisfare ogni esigenza comunicativa di qualsiasi modello. E’ tuttavia di fondamentale importanza mantenere uno standard essenziale, costituito da una descrizione strutturata in linguaggio naturale più la fornitura del codice sorgente, che possa avere quanta maggior diffusione possibile tra gli addetti ai lavori (in particolare in ambito accademico per scopi accademici) favorendo la condivisione, comprensione e valutazione dei modelli (Müller et al. 2014, p.162).

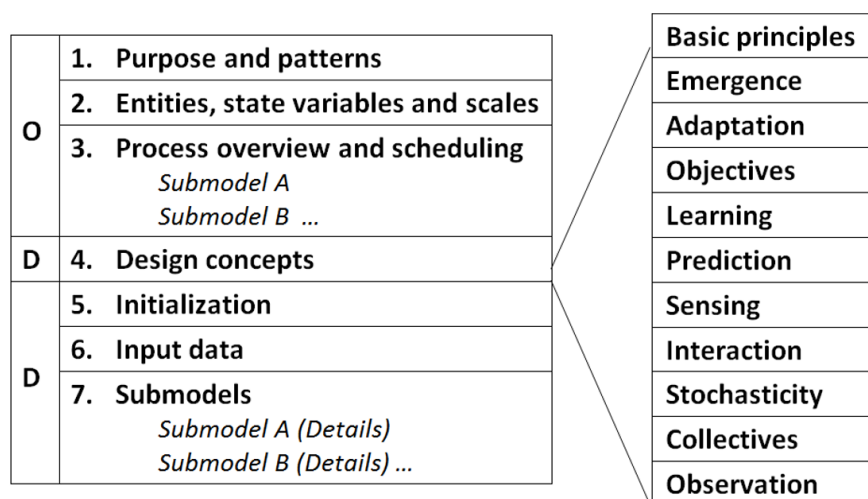


Fig.18 Sintesi schematizzata del protocollo descrittivo ODD

3.5. Un’analisi di collasso *agent-based*. Lo “strano” caso degli Anasazi nella Long House Valley

Artificial Anasazi è sicuramente, in quanto “esperimento-pilota”, l’ABM più conosciuto da antropologi e archeologi. Il modello descrive le dinamiche di popolamento nella Long

House Valley in Arizona tra l'800 e il 1350 (Dean et al. 2000; Axtell et al. 2002; Gumerman et al. 2003); con il suo sviluppo, gli autori hanno dimostrato come da semplici regole “domestiche” nella scelta del luogo per insediarsi e coltivare possono emergere dati comparabili al record archeologico che attesta l’occupazione degli Anasazi nell’area. Per via della sua sorprendente performance il modello ha ottenuto un'attenzione significativa nella comunità e nella letteratura scientifica (Diamond 2002; Kohler et al. 2008) e costituisce uno dei maggiori esempi di successo della modellazione basata sugli agenti.



Fig.19. Veduta meridionale della Long House Valley (da Axtell et al. 2002)

Il modello procede in *step* annuali entro un periodo di 550 anni, ovvero il lasso temporale entro cui la popolazione della valle è aumentata, secondo i dati archeologici, fino a circa 250 famiglie, e in seguito improvvisamente e drasticamente diminuita fino a scomparire del tutto (dopo il 1300 non esistono attestazioni di nuove abitazioni nella valle). Ogni agente rappresenta una famiglia (*household*) di 5 persone, la cui composizione non muta nel tempo. Ogni famiglia, dotata di un'età e uno stock di eccedenze alimentari derivate dagli anni precedenti, genera una domanda per una determinata quantità di cibo. Per soddisfare questa domanda, gli agenti interagiscono con l’ambiente attraverso la coltivazione. Le celle dell’universo artificiale rappresentano porzioni di un ettaro di terreno e sono suddivise in 6 macro-zone, caratterizzate da un potenziale agricolo diversificato. Ogni agente coltiva una propria cella per l'agricoltura, ma può condividere con altri agenti quella in cui risiede. Non

c'è però condivisione di cibo tra le famiglie, e lo stoccaggio del cibo è a livello familiare. Ogni famiglia prende decisioni annuali su dove coltivare e dove stabilirsi. Ogni anno una sequenza di azioni viene eseguita dagli agenti e dalle *patch*:

- Calcolare il raccolto per ogni famiglia
- Se un agente non ricava cibo sufficiente dal raccolto e dall'immagazzinamento o l'età è oltre l'età massima della famiglia, allora l'agente viene rimosso dal sistema
- Calcolare il raccolto stimato per il prossimo anno sulla base del mais in magazzino e del raccolto effettivo dell'anno in corso
- Gli agenti che si aspettano di non ricavare la quantità di cibo richiesta l'anno prossimo si sposteranno in una nuova posizione della fattoria e in un appezzamento per stabilirsi nelle vicinanze.
- Se una famiglia è più vecchia dell'età minima di fertilità, c'è una probabilità p che venga generata una nuova famiglia. La nuova famiglia otterrà una dotazione di una frazione dello stock di mais.
- Aggiornare le fonti d'acqua in base ai dati di input
- Ogni agente, famiglia, invecchia di un anno.

Come dati di input sono integrati file contenenti informazioni sulla localizzazione di fonti d'acqua (fiumi, pozzi, ecc.) e sui loro periodi di disponibilità. Il dato principale è il cosiddetto *Palmer Drought Severity Index*, indice annuale che fornisce (per ogni categoria di copertura del suolo) misurazioni delle condizioni di umidità per coltivare. Per ogni patch è quindi reso noto se si tratta di un anno umido oppure secco per la produzione agricola. Se una famiglia non è in grado di soddisfare il proprio fabbisogno nutrizionale richiesto dalle quantità stoccate e dal raccolto annuale, questa viene rimossa dal sistema. Per determinare invece se l'agente deve compiere uno spostamento, viene effettuata una stima del raccolto per l'anno successivo nella stessa località, in base alla somma dello stock rimasto più la quantità di raccolto prevista, uguale al livello corrente. Come nuovo luogo per coltivare viene selezionata la più vicina tra le celle inoccupate, collocate entro un miglio da una fonte d'acqua, e che producono più del requisito nutrizionale minimo (800 kg). Come luogo di insediamento viene invece scelta la patch non coltivata più vicina a una risorsa idrica e situata entro un miglio dal proprio spazio agrario; la patch abitata dev'essere meno produttiva di quella impiegata per l'agricoltura. Se nessuna cella soddisfa tutti questi criteri, la scelta si effettuerà in base a uso (criterio essenziale) e distanza. In assenza di spazi non coltivati, l'agente lascia il sistema.

Poiché i dati demografici storici utilizzati consistevano in stime approssimative, per ottenere risultati apprezzabili fu necessario calibrare una serie di parametri input, quali la regolazione e la varianza nei valori di quantità del raccolto, l'età alla morte, la fertilità e la probabilità di generare una nuova *household*. L'ipotesi di partenza, che gli autori intendevano dimostrare e che pare essere stata confermata dalle ultime versioni della simulazione, è che l'abbandono del territorio della Long House Valley intorno al 1300 non sia avvenuto esclusivamente per via di fattori ambientali. Analisi a posteriori sul modello⁴³ (Janssen 2009) hanno dimostrato come il successo di Artificial Anasazi dipenda principalmente dalla regolazione della *carrying capacity* (ovvero la capacità dell'ambiente di sostenere un certo numero di individui in una determinata area), mentre la regolazione delle variabili che determinano la demografia degli agenti si è rivelata meno importante. Finché assumiamo che le famiglie abbiano un'esistenza massima di più di 30 anni, e che un'altra famiglia si riproduca in media ogni 6-8 anni, il modello genererà numeri di popolazione che seguono la capacità di carico. Finché la capacità di carico approssima i livelli di popolazione, il modello produce una stretta corrispondenza con i dati. La popolazione non potrebbe aumentare più velocemente del tasso di riproduzione naturale, e il declino demografico è smorzato dallo stoccaggio del mais. Le previsioni errate di una prima generazione del modello hanno aiutato a identificare alcuni limiti e fattori trascurati che si sono rivelati, una volta incorporati nella versione definitiva, fondamentali per il successo della simulazione. Un primo limite, di carattere demografico (la popolazione simulata risultava circa sei volte la popolazione reale), risultò dipendere da un eccessivo determinismo nella riproduzione; il problema fu risolto introducendo una variazione stocastica ai numeri di *default*. Il secondo fallimento avveniva dopo il 1275 d.C., quando la carenza d'acqua avrebbe indotto gli Anasazi ad abbandonare definitivamente la Long House Valley. La simulazione suggerisce che le rese di mais della valle dopo quella data avrebbe ancora potuto nutrire 400 persone, ovvero quasi la metà della popolazione nella fase climax all'inizio del secolo. Per i primi due secoli della loro occupazione della valle, gli Anasazi vi avevano vissuto in maniera non traumatica con una popolazione al di sotto dei 400 abitanti. Perché allora tutti abbandonarono la valle dopo il 1275, quando metà di loro avrebbe potuto continuare a viverci e nutrirsi? Quando gli Anasazi abbandonarono i loro insediamenti, i sopravvissuti furono evidentemente motivati da un fattore non contemplato nel modello. Una possibilità è che una società umana, raggiunto un certo livello di complessità, necessiti di

⁴³ Si rimanda a Carney, Davies (2020) per uno studio sulla riproducibilità del modello.

avere una certa dimensione per mantenere sia i propri individui che le proprie strutture. Un'altra possibilità è che nella definizione dell'ambiente virtuale non siano state prese in considerazione caratteristiche che sarebbero invece state determinanti per la vita nella valle, e che vennero a mancare o a mutare in maniera svantaggiosa nel 1275. Gli ottimi risultati ottenuti non si ritengono ad ogni modo conclusivi in merito alla discussione sull'influenza della siccità e di altri fattori ambientali sull'abbandono della Long House Valley⁴⁴. Gli autori stessi hanno riconosciuto come esistano ulteriori vie percorribili ed ulteriori integrazioni del loro modello, in particolare le interazioni sociali tra famiglie (scambio reciproco di cibo, relazioni di parentela): appartenendo al medesimo tessuto sociale, è improbabile che decisioni di trasferimento siano state prese in modo completamente indipendente dalle altre *households*. In modelli proposti successivamente (ad esempio Reynolds et al. 2003) si è infatti tentato di prendere in considerazione anche relazioni più complesse, specialmente lo scambio nelle reti sociali. A tale proposito Joshua Epstein (2014), basandosi sulle neuroscienze contemporanee, ha più recentemente proposto una modalità per integrare nella modellazione anche fattori di tipo emozionale attraverso l'introduzione di una nuova entità teorica, il cosiddetto “*agent zero*”, dotato di distinti moduli emotivi/affettivi, cognitivi/deliberativi e sociali. Questi componenti interni interagiscono all'interno degli individui per dare origine o influenzare il loro comportamento, spesso tutt'altro che razionale e lineare. Quando agenti multipli di questo nuovo tipo si muovono e interagiscono spazialmente, generano collettivamente una sorprendente gamma di dinamiche che interessano tematiche sociali altamente complesse come il conflitto, la psicologia di massa, o anche la salute pubblica, la legislazione e determinate strategie economiche.

⁴⁴ Cfr. ad esempio Kohler et al. (2008) per una recente discussione sugli effetti delle siccità di lunga durata nel Sud Ovest degli Stati Uniti.

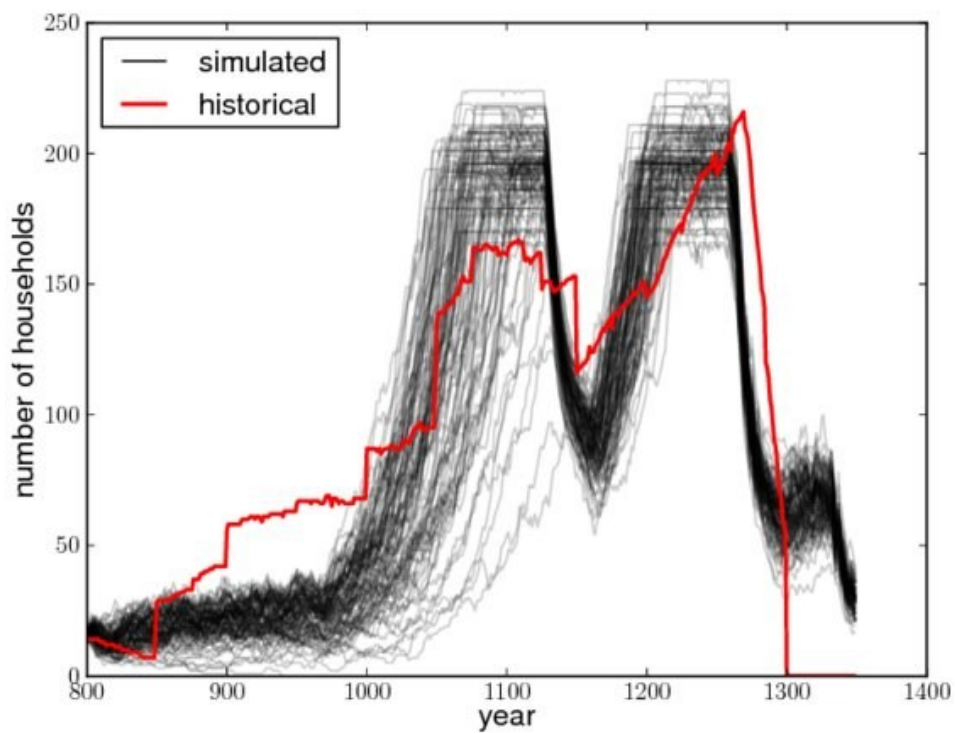
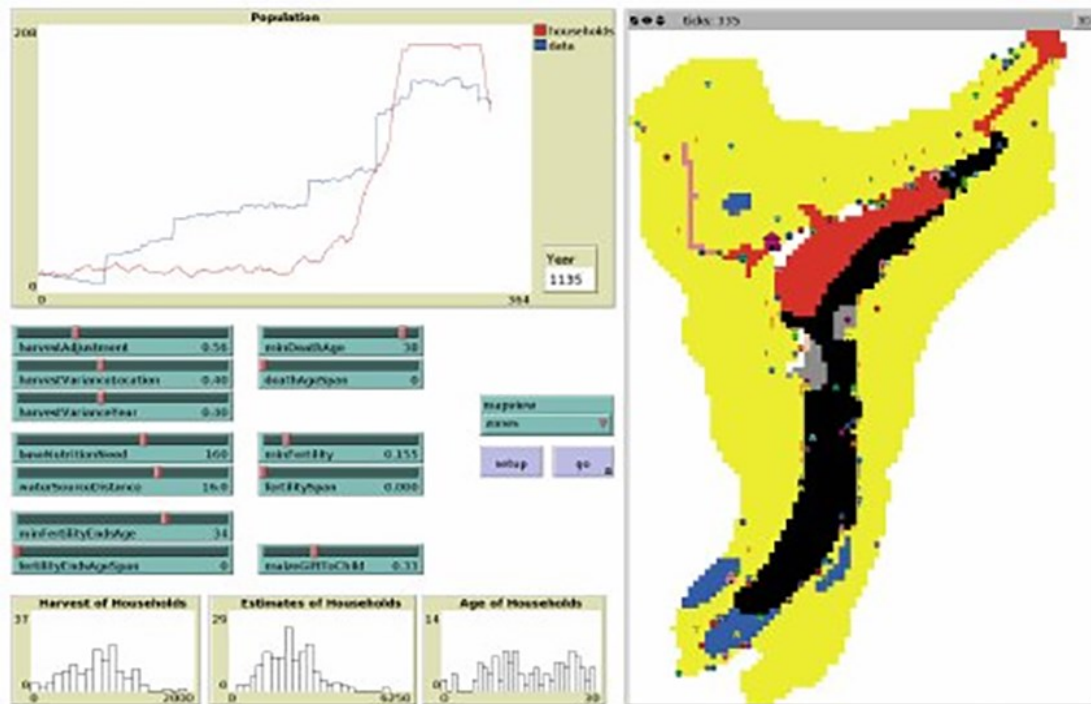


Fig. 20. In alto: interfaccia grafica di Artificial Anasazi implementato in NetLogo da Janssen (2009); in basso: comparazione della simulazione con i dati archeologici (da Stonedahl, Wilensky, 2010).

4. AMPBV SIMULATOR. Un *Agent-Based Model* per la Bassa Veronese

4.1. Dalla Long House Valley alla Bassa Veronese

AMPBV SIMULATOR si ispira all'idea essenziale di *Artificial Anasazi* in quanto “progetto pilota” di rivisitazione del collasso in chiave “*agent-based*”, consiste tuttavia in un concept del tutto nuovo. Pur trattandosi di due scenari di crisi di un sistema antropico, i due casi presentano importanti dissimilarità che hanno condotto, per la nostra sperimentazione, ad un approccio differente sotto vari aspetti:

- In *Artificial Anasazi* il contesto geografico è maggiormente costrittivo e pertanto i contatti con l'esterno sono un fattore maggiormente trascurabile nella simulazione, mentre nel caso della Bassa Veronese è difficile non tenere conto anche di una significativa influenza dei contatti con l'esterno e dei flussi di scambio. E' per questa ragione che si è voluto tentare una prima rappresentazione dei processi di scambio, anche se sia le modalità di interazione interne che quelle “esterne” al sistema siano attualmente ad uno stato di semplificazione che non permette di rendere tali interscambi un oggetto primario di analisi.
- Si è voluto inoltre articolare maggiormente il processo produttivo, contemplando la possibilità per gli agenti di effettuare delle scelte strategiche più specifiche in merito, ad esempio, alle specie vegetali coltivate.
- Gli agenti rappresentati consistono in due categorie gerarchizzate, *households* e *sites*, tra loro maggiormente interattivi. Sono inoltre, nel nostro caso, i siti (e non le famiglie) gli attori principali.
- In *Artificial Anasazi* gli agenti si trasferiscono da una cella all'altra per ottimizzare la propria produzione; nel nostro caso, la mancanza di produttività innesca un altro tipo di comportamento degli agenti, essenzialmente espresso nella forma di scambi e migrazioni.
- Nel modello di Epstein e Axtell si considera un sistema nel suo complesso collocato all'interno di un contesto “chiuso”; nel caso di AMPBV SIMULATOR e dell'universo terramaricolo si tratta di un contesto più ampio e aperto alle comunicazioni, di cui si è scelto, almeno per questa prima fase di sperimentazione, di selezionare un'areale parziale, circoscritto alla Bassa Veronese.

In questa fase del progetto l'obiettivo è quello di costruire un modello agent-based tentando di integrarvi processi pertinenti ad una molteplicità di fattori che hanno possibilmente contribuito al delinarsi, tra il BR2 e il BF, di uno scenario di collasso nel mondo terramaricolo. La zona d'indagine, la Bassa Pianura Veronese, è stata selezionata sia perché ritenuta centrale e "critica" nel sistema terramaricolo nord-padano, e in quanto per essa, come già osservato nei capitoli precedenti, è già nota un'ampia gamma di evidenze derivate da anni di studi dei materiali, analisi di laboratorio, indagini teleosservative e attività sul campo. Con lo sviluppo del modello agenziale qui presentato, per il quale si propone anche una prima sperimentazione preliminare, si auspica, sul piano metodologico, di aprire la strada (per il nostro contesto d'indagine ma non solo) ad una prassi di studio ad oggi ancora probabilmente poco conosciuta in Italia (con pochissime eccezioni, ad es. Gabbriellini 2011) come l'Agent-Based Modeling. Rispetto al contesto d'indagine, e in particolare rispetto ad una lettura del fenomeno "collasso delle Terramare", l'auspicio è quello di contribuire ad una più approfondita comprensione, mediante un approccio predittivo-simulativo, del peso che hanno avuto alcuni fattori nel suddetto processo di crisi e collasso e in particolare fenomeni di stress climatico. Si è pertanto tentato di simulare il "sistema Bassa Veronese" modellandone una serie di aspetti ritenuti particolarmente caratterizzanti e potenzialmente significativi come chiave di lettura dei suoi macro-processi. Il modello qui presentato è stato sviluppato con un consapevole alto livello di rischio dovuto ad un notevole grado di complessità (l'intento era infatti quello di sperimentare un modello "multi-fattoriale" ad alta risoluzione), da cui consegue necessariamente un'impegnativa calibrazione, attività intrapresa nel corso del lavoro, ma che richiederà senz'altro ulteriori verifiche in tempi che vanno ben oltre quelli a disposizione per la presente ricerca. Anche al netto di ulteriori sperimentazioni e di una potenziale espansione del modello sia sul piano processuale (per tener conto di aspetti in questa sede ignorati o solamente abbozzati) che su quello spaziale, è stato comunque possibile effettuare delle prime osservazioni. Lo scopo in questa sede non è trovare una risposta univoca e assoluta alle problematiche della *polity* terramaricola veronese, bensì proporre quello che possiamo considerare una sorta di "strumento di pensiero informatizzato" per l'analisi e la ricostruzione di processi. S'intende offrire, in altre parole, un nuovo mezzo e un nuovo modo per osservare le nostre ipotesi sul passato di questo scenario complesso, permettendo un confronto (e idealmente un riscontro) con le idee sinora formulate in base all'interpretazione del record archeologico. Con AMPBV SIMULATOR si è voluto, in

particolar modo, spingere la rappresentazione ad un livello di dettaglio particolarmente alto, per consentire di esplorare questo universo a diverse scale di osservazione. Un vantaggio importante dell'ABM in generale è inoltre quello di poter correlare, in maniera dinamica, una moltitudine di dati di carattere multidisciplinare (sempre più frequenti nelle indagini archeologiche e senz'altro già ampiamente diffuse nell'ambito degli studi del mondo terramaricolo) in formati che a volte risultano tra loro incompatibili e di difficile lettura nel loro insieme. I succitati sistemi informativi geografici o GIS costituiscono senz'altro, anche per tale ragione, una delle più importanti innovazioni tecnologiche per la gestione di dati spaziali, ma anche con questo strumento può risultare non immediata l'osservazione di scenari nella loro evoluzione diacronica. L'*Agent Based Modeling* permette agli archeologi di osservare l'emergenza di fenomeni storici utilizzando potenzialmente tutte le tipologie di informazioni di cui disponiamo, incluse formulazioni teoriche sottoforma di processi, “combinandoli” in maniera organica e soprattutto dinamica. Anche un utente non esperto di informatica avrà la possibilità di osservare e di intervenire direttamente sul sistema manipolando, anche nel corso della simulazione (grazie all'approccio *open-box* che caratterizza i modelli basati sull'agente) una oppure molteplici variabili della gamma integrata. Si propone qui una descrizione sistematica del modello, seguendo il riferimento del protocollo ODD. Ai fini di una maggior ricchezza espositiva viene integrata anche una breve descrizione dell'interfaccia di AMPBV SIMULATOR e ampliata la sezione dedicata ai dati di input, qui definita “dati di riferimento”, in cui si riportano le principali risorse utilizzate.

4.2. Overview

4.2.1. Obiettivi

Come già menzionato, lo scopo di AMPBV SIMULATOR è poter meglio comprendere le modalità con cui il sistema terramaricolo delle Valli Grandi Veronesi Meridionali è andato incontro al collasso, simulandone alcuni processi critici nell'arco di tempo a partire dalla sua fase climax nella seconda metà del Bronzo Recente, durante il quale una fase di tracollo ha colpito, sebbene in tempi diversi, questa civiltà in toto. Si intende quindi valutare la misura dell'impatto che ebbero con maggior probabilità determinati fattori ritenuti cruciali per le sorti del sistema. Si sono intraprese una ricostruzione verosimile (per quanto possibile) dell'ambiente, inteso come territorio e clima, e una simulazione delle attività di produzione, consumo e scambio tra le singole entità agenziali di primo livello, individuate negli

insediamenti (cfr *infra*), per poter “stressare” in modi diversi gli agenti e analizzarne il comportamento. Nonostante in questa fase di sviluppo sia possibile analizzare solo in parte alcuni fenomeni, l’obiettivo posto è quello di:

- Saggiare il possibile impatto del clima sul sistema antropico della Bassa Veronese, considerando sia una transizione progressiva dei parametri ambientali che il verificarsi di un eventuale cambiamento climatico repentino e di più tangibile intensità. Per contribuire a tale valutazione si è tentato di definire:
 - Micro-fluttuazioni climatiche a livello locale, con cadenza annuale e stagionale
 - Una soglia di sopravvivenza di una selezione delle principali specie coltivate a tali fluttuazioni climatiche
 - Un’adeguata regolazione della produttività agricola in base alla sensibilità specifica della specie e ai parametri climatici attivi
 - Una modulazione di parametri-base delle unità spaziali (*patch*), e quindi del territorio, funzionali alla coltivazione (in particolare la coltivazione cerealicola)
 - Una soglia di sensibilità dell’uomo (e conseguentemente delle comunità insediate) rispetto ad eventuali crisi produttive
- Valutare il possibile impatto sul territorio di una presenza antropica imponente e pertanto necessitante quantità al di sopra delle capacità rigenerative delle risorse locali. Per tale ragione sono state definite:
 - Una soglia di tolleranza (di “improduttività”) per le unità coltivate o coltivabili, dell’ipersfruttamento a scopo agricolo
 - Una regolazione della produttività agricola delle unità spaziali in base al livello di sfruttamento del terreno
 - Una capacità di adeguamento comportamentale, da parte degli agenti-sito, finalizzata al mantenimento della produttività dei suoli
- Osservare l’effetto di un eventuale incremento o decremento drammatico e repentino della popolazione sul sistema. In prospettiva di intervenire selettivamente su categorie specifiche (ad es. uomini adulti, bambini ecc.) si è provveduto a:

- definire sotto-unità attoriali (rappresentanti l'unità familiare) entro cui articolare la popolazione per genere e per fasce di età
 - modellare di un processo di aggiornamento della popolazione che preveda una probabilità di morte differenziata per fasce di età
 - definire una soglia minima di popolamento oltre la quale un sito cessa di essere tale e, virtualmente, “muore”
 - Definire una percentuale di lavoratori, intesi come popolazione destinata alla produzione e da cui in parte dipende il successo della stessa
- Far emergere attività e relazioni di scambio tra gli attori delle Valli Grandi Veronesi, e quindi osservare la reciproca influenza tra queste attività, la produzione locale e la sopravvivenza dei siti e dell'intero sistema. Si è perciò provveduto a:
- Una modellazione dei processi di scambio tra gli agenti-sito influenzati dalla domanda e offerta e dai rapporti inter-agenziali pregressi
 - Una definizione delle relazioni tra siti sottoforma di connessioni (*link*) in progressivo aggiornamento secondo l'esito di ciascuno scambio
 - La selezione di tre macro-categorie di beni di scambio di prima necessità, la cui domanda e offerta dipende dalla popolazione e dalla produzione locale
- Valutare il peso del vantaggio (o svantaggio), in termini di probabilità di sopravvivenza, sviluppo e inviluppo, di una determinata collocazione dei siti sia all'interno del paesaggio geografico che all'interno della rete di interscambio, e conseguentemente alla capacità di sfruttamento o procacciamento (sia sottoforma di produzione primaria che di acquisizione “commerciale”) delle risorse. Per osservare questo aspetto si è provveduto a:
- Acquisire e produrre dati mappali quanto più possibili adeguati all'epoca in esame
 - integrare un database dei siti con ipotetica estensione e collocazione (coordinate geografiche)
 - modellare, secondo quanto già definito nella descrizione dei precedenti obiettivi, i processi di interazione sito-sito e sito-ambiente

In sintesi, sia i quesiti che la scelta dei processi implementati riguardano tre fattori determinanti, in un senso o nell'altro, per le sorti del sistema:

- 1) quello ambientale (oscillazioni climatiche, crescita vegetale, trasformazione del paesaggio, accessibilità delle risorse, regolazione delle proprietà dei suoli)
- 2) quello demografico (sviluppo, sopravvivenza, crescita e decrescita, selezione, stabilità e instabilità)
- 3) quello economico (produzione e gestione delle risorse, incremento e decremento degli scambi, emergenza di “rotte” approvvigionamento, fidelizzazione e gerarchizzazione)

4.2.2. Entità, variabili di stato e risoluzione

In AMPBV SIMULATOR sono presenti tutte le categorie agenziali previste da NetLogo: agenti a coordinate variabili o *turtle*, agenti “relazionali” (*link*) tra *turtle*, agenti a coordinate fisse o *patch*.

L'ambiente: lo spazio, il clima, il network e i “vicini”

L'ambiente con cui interagiscono gli attori principali del sistema è costituito nel suo insieme da tutte le succitate tipologie agenziali. Le *patch* o celle spaziali sono definite da attributi caratterizzanti come la qualità del suolo, l'uso del terreno, la produttività l'entità politica (sito) di appartenenza, la percorribilità (espressa da attributi specifici che le caratterizzano localmente, come fangosità, presenza di alberi o presenza d'acqua). Sono modellate come variazioni di parametri locali, e dunque espresse in forma di attributo delle *patch*, anche proprietà climatiche come temperature e precipitazioni, che derivano in realtà da macro-fluttuazioni stagionali espresse nel modello come *globals*. Le variabili globali definiscono, per lo più, valori di riferimento e soglie (modulabili mediante *sliders* di cui è dotata l'interfaccia) che pongono dei limiti vitali e/o funzionali al sistema e ai suoi agenti. Esistono anche due tipologie di agenti, detti *nodes* e *connective-links* (rispettivamente appartenenti alle categorie *turtle* e *link*) che appartengono in “forma latente” all'universo della simulazione in quanto non operano attivamente nel sistema e non si identificano in attori sociali o entità socio-politiche, ma costituiscono parte dell'ambiente con cui *sites* e *households* si interfacciano per determinare le loro scelte. *Nodes* e *connective-links* sono stati integrati nel sistema per costituire un network di collegamenti spaziali e tenendo conto di distanze ponderate in funzione della facilità di percorrenza, i loro attributi sono infatti definiti per rappresentare unicamente questo aspetto. Un'ulteriore specie (o meglio *breed*) di agenti “ambientali” è costituita dai cosiddetti *borders*. Lo scopo di questa categoria di agenti è quella di creare dei punti di connessione tra il sistema interno all'*universo* (con cui s'intende lo

spazio virtuale in cui operano gli agenti nel modello) e l'esterno; si tratta di un espediente per individuare, nell'ottica dell'attivazione di una rete e di processi di scambio, aree maggiormente vocate al transito (sia in ingresso che in uscita) di beni, in particolare il metallo, creando una sorta di "differenza di potenziale" tra gli insediamenti.

Gerarchia degli attori principali: siti e famiglie

Le *turtle* sono gerarchicamente organizzate in due *breed*: il livello gerarchico superiore è costituito dall'unità insediativa (*site*, il sito), a cui sono associati gruppi di *household*, ovvero unità familiari, che appartengono al livello gerarchico inferiore⁴⁵. Buona parte degli stati associati alle *household* dipende dallo stato del sito di pertinenza (l'appartenenza reciproca, per le *turtle* ma anche nel caso delle *patch*, è indicata da un attributo dedicato). Gli attributi delle *household* ne definiscono sostanzialmente la composizione dal punto di vista demografico (numero, sesso ed età dei componenti) o servono alla definizione degli stessi all'interno dei processi; i *sites* o siti, che costituiscono di fatto l'attore maggiormente operativo all'interno del sistema, sono definiti da un maggior numero di attributi (a loro volta pertinenti ad un maggior numero di processi), quelli principali riguardano: la composizione demografica complessiva e per fasce d'età; l'areale di approvvigionamento e il suo utilizzo; la disponibilità e la necessità di beni da destinare sia al consumo che al commercio. Si è scelto quindi di modellare come *turtles* non solo le famiglie che, occasionalmente, possono spostarsi (per trasferimento da un sito all'altro), ma anche gli insediamenti, benché questi mantengano invariata la loro posizione nello spazio; tale scelta deriva dall'esigenza di dotare i siti di maggiori funzionalità rispetto a quelle disponibili per le *patch*, come la possibilità di scomparire/morire, o generare *link* (in questo specifico caso direzionali e denominati *relational-links*) dall'uno all'altro.

Variabili di stato

Vengono qui riportate le variabili di stato del sistema AMPBV SIMULATOR, raggruppate per unità agenziali di appartenenza.

Node/nodes

⁴⁵ I dati relativi alle necropoli nell'ambito terramaricolo (si veda ad esempio l'organizzazione spaziale a Casinalbo, cfr. Cardarelli 2014) suggeriscono in realtà un'articolazione societaria più complessa, con macro-raggruppamenti di più gruppi familiari. In questa sede, ai fini di una semplificazione, questo aspetto di carattere più strettamente culturale e politico non è stato rappresentato nella modellazione.

Definiscono, assieme ai *connective-links*, l'agibilità dell'ambiente nel sistema.

Influenzano: sites, households

Variabili di stato:

- Mud? Se il valore corrispondente (che dipende dall'umidità del suolo - attributo *soil-moisture*- nella patch in cui è situato) è *true*, indicano la presenza di terreno fangoso
- Water? Se il valore corrispondente (che dipende dall'identità della patch in cui è situato) è *true*, indicano la presenza di un corpo idrico
- Forest? Se il valore corrispondente (che dipende dall'identità della patch in cui è situato) è *true*, indicano la presenza di un'area boschiva

Connective-link/connective-links

Definiscono, assieme ai *nodes*, l'agibilità dell'ambiente nel sistema.

Influenzano: sites, households

Variabili di stato

- Slope ossia la pendenza
- Weight ossia il costo di percorrenza nello spazio sotteso

Patch (patches)

Costituiscono l'unità spaziale principale dell'ambiente geografico del sistema.

Interagiscono con: sites, households

Influenzano: sites, households, nodes

Variabili di stato:

Generali

- identity: indica l'elemento principale che costituisce la copertura o la modalità di sfruttamento dell'unità spaziale in questione
- my-site: indica, quando presente, il sito di appartenenza, ovvero il sito che gestisce e a cui è destinata la produzione della patch
- p-node: attributo di carattere funzionale, che indica il nodo della rete connettiva più vicino alla cella; serve per calcolare la distanza ponderata da e verso la patch
- altitude: la quota sul livello del mare, il cui valore è acquisito al setup dal valore corrispettivo nel *Digital Terrain Model*

Climatiche

- *watertable*: indica il livello della falda freatica rispetto al piano di campagna
- *soil-texture*: la tessitura del suolo. Il dato è ricavato dalla rispettiva mappa acquisita dal sistema in fase di inizializzazione. Da questo attributo dipendono una serie di attributi secondari: *soil-weight*, ovvero il peso specifico del suolo; *field-capacity*, la capacità di campo, ovvero la massima quantità di acqua che un suolo può trattenere al netto dell'acqua transitata per gravità; *wilting-point*, il punto di appassimento e *saturation-point*, o punto di saturazione. Questi attributi sono funzionali, insieme alla tabella *fringes (global)* al calcolo dell'umidità del suolo (*soil-moisture*), che a sua volta influenza la produttività (*productivity*) della cella (cfr. sottoprocesso *compute-productivity*).
- *MeanT*: temperatura media stagionale, valore estratto stocasticamente in base al valore stagionale di base *Mean*SEASON**
- *MaxT*: temperatura massima stagionale, valore estratto stocasticamente in base al valore stagionale di base *Max*SEASON**
- *MinT*: temperatura minima stagionale, valore estratto stocasticamente in base al valore stagionale di base *Min*SEASON**
- *Precipitations*: somma delle precipitazioni stagionali, valore estratto stocasticamente in base al valore stagionale di base *Min*SEASON**
- *Mean*SEASON**: temperatura media stagionale, valore acquisito dalla rispettiva mappa climatica importata al *setup*
- *Max*SEASON**: temperatura massima stagionale, valore acquisito dalla rispettiva mappa climatica importata al *setup*
- *Min*SEASON**: temperatura minima stagionale, valore acquisito dalla rispettiva mappa climatica importata al *setup*
- **SEASON*-precipitations* somma delle precipitazioni stagionali, valore acquisito dalla rispettiva mappa climatica importata al *setup*

Produzione

- `production`: la quantità di cibo effettivamente prodotta da una *patch* coltivata
- `crop-type`: la specie cerealicola coltivata nella cella
- `charge`: il livello di sfruttamento agricolo rispetto al ciclo di rotazione; il suo valore diminuisce quando la *patch* è coltivata e incrementa (entro il limite massimo stabilito) quando la *patch* non è coltivata
- `soil-fertility` la ricchezza del suolo. Dipende dallo sfruttamento a lungo termine delle *patch* coltivate (il valore decrementa durante l'uso) e ne influenza variabilmente la produttività in base alla specie vegetale presente
- `Workers-here`: numero di lavoratori presenti in una *patch* coltivata

Site/sites

Svolgono le principali azioni all'interno del sistema. La loro "vita" dipende dalla numerosità della loro popolazione, la quale dipende a sua volta dalle *households*. Provvedono al fabbisogno di beni locali, gestiscono la produzione e lo scambio. Controllano un'area ad essi circostante che funge da area insediativa e bacino di approvvigionamento (*catchment-area*).

Interagiscono con: *patches*, *households*, *relational-links*

Influenzano: *sites*, *households*, *patches*, *relational-links*

Variabili di stato:

- `Name`: nome del sito in letteratura
- `chrono`: cronologia del sito
- `size`: indica l'estensione (in ettari) dell'insediamento
- `my-farthest-patch`: indica la *patch* di pertinenza con maggior distanza dall'agente. E' funzionale al calcolo del raggio di pertinenza del sito
- `my-node`: attributo funzionale al calcolo della distanza ponderata, indica il nodo più prossimo al sito
- `my-metal-distance`: indica la distanza ponderata dalla più vicina via d'accesso (*border*) al flusso di metalli

household/households

Costituiscono la minima unità di agente nel sistema. Sono legate da un rapporto di appartenenza al sito in cui risiedono, da cui ricevono sostentamento e al quale prestano

lavoro. Dalla loro presenza, quantità e composizione, da cui dipende la quantità di popolazione complessiva, dipende la sopravvivenza del sito.

Interagiscono con: sites

Influenzano: sites, patches

Variabili di stato:

- my-home: il sito di appartenenza
- family: tabella, in cui è riportato, per ogni categoria di genere e fascia di età, il numero di componenti del nucleo familiare
- f-family-clock: tabella, in cui è riportata l'età di ciascun componente familiare di sesso femminile
- m-family-clock: tabella, in cui è riportata l'età di ciascun componente familiare di sesso maschile

border/borders

Definiscono aree sensibili per i flussi di scambio con l'esterno.

Interagiscono con: sites

Influenzano: sites, relational-links

Variabili di stato:

- b-node: attributo di carattere funzionale, che indica il nodo della rete connettiva più vicino; serve per calcolare la distanza ponderata da e verso ogni sito
- offer-1: indica il bene di scambio offerto dall'agente
- demand-1: indica il bene di scambio di primario interesse per l'agente
- favourite: indica il sito con cui l'agente calcola una miglior possibilità di profitto da uno scambio

relational-link/relational-links

- reputation: valore cumulativo che indica il numero di transazioni di beni avvenute con esito positivo per i due siti collegati dal link

connective-link/connective-links

- slope: valore di pendenza

- *weight*: “peso” del percorso dal punto di vista dello sforzo fisico, differenziato in base alle caratteristiche fisiche delle celle presenti

Scale: AMPBV SIMULATOR è un modello ad alta risoluzione, soprattutto per quanto riguarda la risoluzione temporale: un ciclo (un *tick*) corrisponde infatti ad una stagione. Per quanto riguarda la risoluzione spaziale, ad ogni cella o patch corrisponde un ettaro di terreno.

Panoramica e programmazione dei processi

Si propone in questa sezione la sequenza dei processi principali implementati all'interno di AMPBV SIMULATOR nel loro ordine operativo, fornendone sia una descrizione discorsiva generale che, per maggior chiarezza, un diagramma di flusso con illustrata la sequenza dei processi principali

Cambio di stagione: Avendo una risoluzione temporale stagionale, ogni ciclo di AMPBV SIMULATOR viene avviato con il settaggio di nuovi parametri climatici stagionali.

Produzione. In base ai parametri correnti e a quelli registrati (come sorta di “memoria” a medio termine), viene avviato il macro-processo di produzione locale, in cui gli agenti di primo livello, ovvero i siti, operano con l'intento di produrre scorte alimentari per il proprio autosostentamento. Se la stagione in corso è l'autunno, ovvero la stagione in cui si suppone avvenire la semina delle specie cerealicole maggiormente coltivate, i siti organizzano la produzione a partire dall'organizzazione della propria *catchment-area*, eventualmente estendendo il proprio territorio e assegnando a ciascuna cella la propria destinazione produttiva. L'assegnazione delle *crops* avviene in base alla rotazione prevista e alla produzione del precedente raccolto, mentre quella delle *pastures* in base alla popolazione presente. In seguito viene selezionata la coltura più idonea all'umidità del terreno stimata e assegnata la manodopera in base alla popolazione presente. Se i lavoratori disponibili sono in numero insufficiente, i siti generano una necessità di lavoratori che viene espressa nella domanda di scambio. Ogni stagione le patch coltivate calcolano un valore di produttività in base alla fertilità (che decrementa con l'utilizzo) del suolo, all'umidità (calcolata in base alle caratteristiche del suolo e ai fattori climatici) e alla manodopera impiegata. Quando il ciclo fenologico delle specie coltivate si conclude avviene il raccolto (processo *harvest*): le patch rendono una quantità corrispondente al livello medio di produttività calcolato per l'intero periodo di crescita.

Scambi. I siti che necessitano di lavoratori, metallo (valore determinato in base alla popolazione presente – esigenza locale – e alla posizione all'interno del *network* di scambi) o beni alimentari (sono queste le tre categorie soggette allo scambio inter-sito) assegnano a se stessi rispettivi valori di necessità e quindi di *domanda*, quest'ultimo valore relativo alla richiesta generale del bene in questione all'interno di tutto il sistema. Viceversa, se un sito dispone di un surplus, lo riporta come valore di disponibilità che si traduce in *offerta* (anche in questo caso valore relativo all'intero sistema). I siti che necessitano di un qualche bene acquisibile (e dispongono di una quantità da rendere come contropartita) cercano un *partner* di scambio compatibile in base a domanda e offerta. Se sono presenti siti idonei, verrà selezionato come partner il più promettente rispetto alle rispettive priorità, avente domanda e offerta il più possibile complementari, minor distanza ponderata (tenendo conto, cioè, della percorribilità degli spazi che dividono i siti e dunque del costo energetico necessario a coprire tale distanza) e, se possibile, un rapporto fiduciario pregresso (definito con l'attributo *reputation* del *link* relazionale che connette i due agenti). I siti che trovano un partner procedono con lo scambio; le quantità trasferite da un agente all'altro dipendono sia dalla disponibilità individuale delle due parti in causa, sia da un valore generale attribuito a ciascun bene (*adjustment*) in base alla disponibilità e alla richiesta generale all'interno di tutto l'universo.

Consumo. I siti impiegano e consumano le risorse a loro disposizione, a partire dal legname, che comporta una progressiva erosione dell'area boschiva (in funzione della quantità di popolazione e della stagionalità). Vengono consumate anche le derrate alimentari, e se il fabbisogno alimentare viene disatteso, il sito “annota” in una specifica lista *hunger* una quantità di riferimento di individui affamati che, al trascorrere del tempo oltre una determinata soglia (qualora l'insoddisfazione alimentare dovesse protrarsi), abbandoneranno il sito (come *households*).

Aggiornamento demografico. Come in ogni comunità antropica esistente, i suoi componenti portano avanti il proprio ciclo vitale riproducendosi, invecchiando e morendo. Aumenta quindi l'età dei membri familiari (valori tabellari) appartenenti alle *households*, e parte di questi va incontro al decesso sia per vecchiaia che per altri fattori non determinati (la probabilità di morte è determinata in maniera stocastica). Il tasso di mortalità può incrementare in presenza di un elevato livello di denutrizione, che condiziona, in negativo, anche il tasso di natalità. Quando sono presenti all'interno delle famiglie più individui adulti,

questi andranno a costituire nuove *households*; nel caso invece che una *household* esaurisca i componenti viventi al suo interno, essa scompare.

Aggiornamento dei siti. Uno stato di denutrizione generalizzato non incide esclusivamente sulle singole unità familiari ma anche, più o meno direttamente, sull'intera comunità e più precisamente sul loro sito di appartenenza. Se oltre una determinata soglia temporale un sito non risolve un protratto problema di scarsità alimentare, parte delle famiglie abbandona il proprio centro di appartenenza, tentando di trasferirsi all'interno di un sito maggiormente provvisto di riserve alimentari. Se all'interno del sistema è presente un sito idoneo all'accoglienza di nuove *households*, parte o tutte le famiglie migranti vi si insedieranno. In caso contrario, se le famiglie non trovano una nuova casa entro la soglia temporale stabilita, saranno rimosse dal sistema. Per quanto riguarda invece gli insediamenti che vanno incontro allo spopolamento, quando il numero di adulti nelle famiglie al suo interno scende sotto la soglia predeterminata cessano di esistere, e la comunità residuale di loro appartenenza si riduce a sua volta, conseguentemente, in più famiglie migranti.

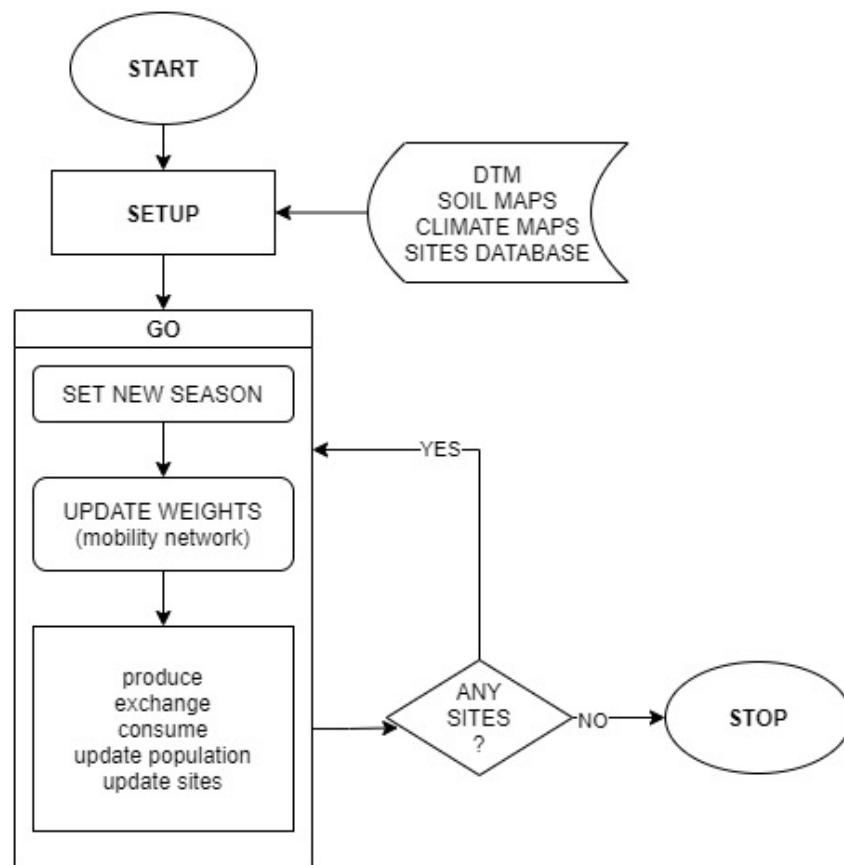


Fig 21. Diagramma di flusso generale del modello

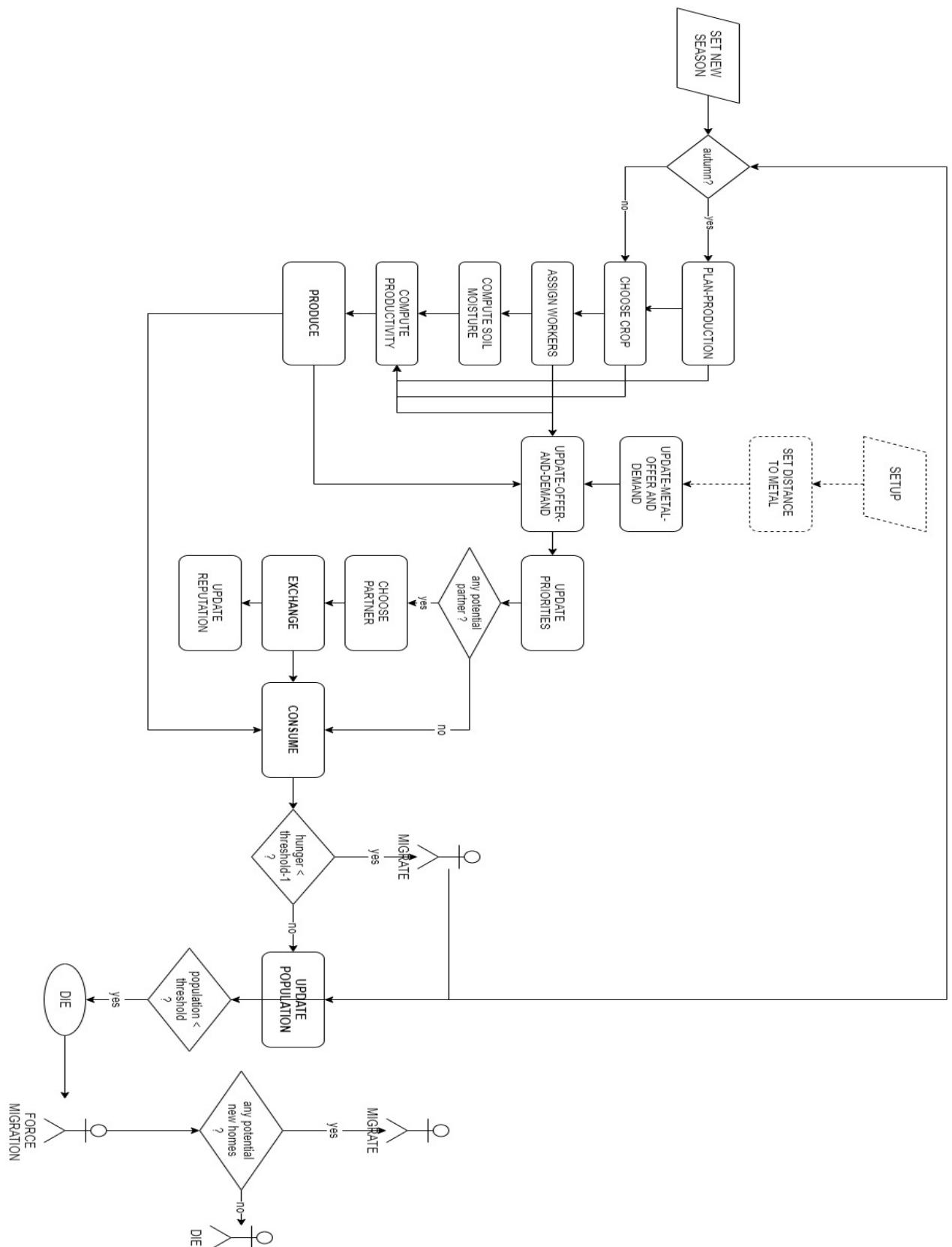


Fig. 22. Diagramma di flusso descrittivo della procedura GO, in cui sono differenziate le azioni da parte degli agenti-sito e degli agenti-households (omino stilizzato).

4.3. Design concepts

4.3.1. Principi di base

Il comportamento degli agenti all'interno di AMPBV SIMULATOR, finalizzato al proprio sostentamento e alla propria sopravvivenza, è regolato principalmente dall'interazione con un ambiente mutevole, il cui potenziale produttivo dipende sia da fattori esterni indotti (il controllo sulle variazioni del clima è discrezionale) sia da fenomeni emergenti all'interno del sistema. Questi fenomeni sono esito del comportamento di più categorie agenziali: sites, households, e patches, i quali agiscono secondo le seguenti regole di base:

- gli agenti-sito o *site* producono/acquisiscono risorse attraverso l'interazione con l'ambiente (quindi con gli agenti spaziali patch) per disporre di quantità energetiche sufficienti al mantenimento delle loro unità domestiche o households.
- I siti si appropriano dello spazio (quindi delle patch) a loro circostante in proporzione alla quantità di risorse necessitate e in funzione alla produttività delle celle
- prerogativa necessaria per l'esistenza dei siti è la presenza, presso di loro, di un numero minimo di households. Se il numero di households presenti scende al di sotto della soglia minima, il sito cessa di esistere
- le households sopravvivono a loro volta alle seguenti condizioni:
 - ad esse deve appartenere almeno un componente familiare
 - deve esistere, in tutto l'universo rappresentato, almeno un sito in condizioni di accoglierle, ovvero almeno un sito che disponga di riserve energetiche tali da garantirne il nutrimento necessario
- In assenza di un apporto di risorse sufficienti, i siti cercheranno di procurarsi quanto necessario offrendo in cambio beni a loro disposizione
- Prerogativa di ogni scambio è che esista un interesse economico reciproco, ovvero che la domanda e l'offerta delle due parti coinvolte sia bidirezionale e complementare
- Il rapporto ricavo/perdita derivante dalle transazioni precedenti influenza la scelta del partner di scambio
- Se la quantità di risorse a disposizione del sito (derivante sia dalla produzione diretta che dallo scambio con altri agenti) risulta inferiore rispetto ai consumi delle households presenti, ciò avrà un effetto negativo sulla loro prolificità e sulla loro sopravvivenza

- le households possono migrare da un sito all'altro per fattori casuali (in minima parte) o per incrementare la propria probabilità di sopravvivenza qualora le esigenze energetiche non vengano soddisfatte dal sito di appartenenza

Le suddette regole sono espresse all'interno di processi relativi a ciascuna delle classi di agenti (o a determinati set di agenti che appartengono alla medesima classe). L'esito di questi processi è determinato in parte da condizioni sistemiche globali, in parte da condizioni locali (che hanno influenza, cioè, sul micro-sistema entro cui opera l'agente) e in parte dalla determinazione stocastica di fattori il cui andamento non è prevedibile o controllabile secondo meccanismi espliciti. Nelle loro attività, nei loro cambiamenti e nelle loro interazioni, gli agenti e l'ambiente rispondono direttamente sia alle loro caratteristiche intrinseche che al loro stato corrente, con conseguenze indirette, più o meno macroscopiche, sull'intero sistema.

4.3.2. Emergenza

Il macro-fenomeno emergente che s'intende osservare come principale oggetto di analisi è, quindi, il collasso degli agenti nel sistema. All'interno del modello, lo stato ultimo del collasso comporta la "morte", dunque la cessata esistenza dei siti presenti, che si manifesta come combinazione e conseguenza di fenomeni emergenti minori, in particolare:

- La produttività progressivamente (per via dell'eccessivo sfruttamento) o improvvisamente (per via di una forte crisi climatica) ridotta induce i siti a scambiare tra loro
- I siti aventi maggior estensione hanno un numero maggiore di abitanti, quindi destinano un maggior numero di *patch* alla produzione per venire incontro alle proprie esigenze locali. Un numero maggiore di patch produttive induce, in condizioni ottimali, ad una quantità disponibile probabilmente maggiore in proporzione ai centri minori. Viceversa, in condizioni ambientali sfavorevoli e in spazi limitati essi possono divenire, in assenza di forme di supporto alternative, maggiormente vulnerabili.
- I siti la cui strategia locale ha garantito una maggior produttività (per condizioni più favorevoli o per casualità) accumulano maggiore riserva, che conferisce loro un maggior potenziale e quindi una maggior presenzialità negli scambi, dunque una maggior incidenza sui flussi delle risorse all'interno del network

- I siti aventi un maggior numero di rapporti di scambio consolidati con altri siti hanno maggior probabilità di sopravvivenza.
- Una riduzione del numero di agenti nel sistema comporta una minor disponibilità complessiva di beni di scambio, quindi riduce la probabilità di sopravvivenza anche degli agenti rimanenti. D'altro canto, una maggior presenza di spazio disponibile può dar loro maggior possibilità di sostentamento autonomo.
- Una riduzione della produttività locale delle *patch* comporterà, per i siti, la necessità di ampliare la loro area agraria.
- Un ampliamento dell'area agricola comporta la necessità di impiegare un numero maggiore di lavoratori, e quindi (a parità di popolazione) una riduzione del numero di lavoratori per patch, quindi un decremento produttivo all'interno della singola cella spaziale.
- L'ampliamento dell'area agraria e il consumo di legname comportano un progressivo ampliamento del bacino di approvvigionamento, eventualmente a discapito dei centri abitati meno estesi.
- In assenza di derrate sufficienti all'interno del proprio insediamento, le *households* migrano in siti più forniti. La migrazione comporta un vantaggio reciproco con una produttività minima garantita (le nuove famiglie avranno cibo e il nuovo sito avrà lavoratori); se la produttività è bassa, invece, il rapporto lavoratori/individui da sfamare diventa più svantaggioso. Un sito che riceve tanti afflussi migratori in un momento in cui l'intero sistema sta subendo la crisi produttiva, se la crisi non è superata in tempi brevi diventerà in tempi molto rapidi estremamente vulnerabile al collasso, specialmente se in concomitanza con uno stato di progressivo isolamento.

4.3.3. Adattamento

Gli agenti all'interno di AMPBV SIMULATOR sono dotati di un certo livello di adattabilità, sia in risposta al comportamento e/o alle caratteristiche di altri agenti, come nel caso dei processi di scambio, sia in risposta a possibili cambiamenti nell'ambiente con cui si rapportano:

- La modalità di adattamento più semplice, e al contempo fondamentale per la simulazione, da parte degli agenti consiste nell'adeguamento dei siti della loro area di

approvvigionamento in base alla quantità di risorse accessibili (fattore ambientale) e alla quantità di popolazione da sfamare (fattore agenziale).

- Nella loro produzione i siti tengono anche conto di un margine di sicurezza (o per maggiori opportunità di scambio), che determina l'area di approvvigionamento massima. In assenza di spazio sufficiente, tuttavia, gli agenti occuperanno uno spazio proporzionalmente inferiore, dando priorità alla destinazione cerealicola ma mantenendo un margine minimo di pascolo.
- In caso di scarso successo agrario, i siti hanno inoltre la facoltà di coltivare specie vegetali dal ciclo più breve (colture macroterme) per incrementare le proprie riserve e dunque le proprie probabilità di sopravvivenza.
- Nel caso di interazione di scambio tra un sito e l'altro, questi adeguano la quantità ceduta in base a quanto ricevuto. Il valore dei beni scambiati, a sua volta, viene attribuito in base alla disponibilità complessiva nell'area, ossia la disponibilità complessiva all'interno della *polity*.

4.3.4. Idoneità

Gli agenti all'interno del modello, avendo come obiettivo primario la sopravvivenza, aspirano implicitamente alle migliori possibili condizioni esistenziali e ambientali che possano garantirla. Perseguendo questa finalità essi regolano diversamente il loro comportamento in base alla tipologia a cui appartengono.

- Gli agenti-sito (*sites*) provvedono al fabbisogno locale tramite la produzione (attraverso l'azione delle proprie *patch* dedicate allo scopo) e lo scambio. Nel caso della produzione, essi valutano:
 - Annualmente, la quantità di spazio da destinare alle colture in base:
 - a) alla produzione per unità avuta con il ciclo colturale precedente
 - b) alla quantità e alla composizione della popolazione presente, dunque in base ai componenti delle proprie *household*
 - Annualmente o stagionalmente, la specie cerealicola coltivata in base alla stagione e alla presunta umidità del suolo.
- Nel caso dei processi di scambio i siti selezionano l'agente con cui interagire (*partner*) in base a:

- il rapporto tra la propria domanda/offerta e quella del potenziale partner, in modo da massimizzare il proprio tornaconto utile e minimizzare la quantità da cedere
- la minor distanza ponderata, ovvero il minor dispendio energetico per raggiungere il partner
- la miglior reputazione, la quale risulta consolidata o deteriorata dai precedenti rapporti di scambio e dunque induce a preferire un sito all'altro

Anche gli agenti di gerarchia inferiore, le *household*, a loro volta possono migrare da un sito all'altro (o in seguito alla scomparsa del proprio sito di origine), e selezionano la loro destinazione in base alla presunta capacità di provvedere al loro fabbisogno alimentare. Sono stati implementati tre differenti criteri di selezione possibile:

- migrazione verso siti aventi un grado di benessere maggiore (o meglio un grado di affamamento minore, parametro *hunger*) rispetto alla media della *polity* (criterio meno selettivo).
- migrazione verso siti aventi un grado di benessere oltre la soglia minima (criterio intermedio)
- migrazione verso siti aventi un *surplus* alimentare rispetto al proprio fabbisogno locale (criterio più selettivo).

4.3.5. Apprendimento e predittività

Parte degli agenti nel modello è dotata di capacità predittive che esercitano in base a quanto appreso dalla loro precedente esperienza. Ogni qualvolta, infatti, che viene aggiornata ed assegnata la loro area produttiva, gli agenti-sito stabiliscono un numero di patch da destinare alle colture adeguandolo non solo al fabbisogno corrente della loro popolazione, ma anche a quanto è stato prodotto (mediamente) in ogni ettaro coltivato l'anno trascorso. Essi non hanno diretta cognizione dello stato di fertilità del suolo coltivato, ma possono presumerlo in base alle quantità di cereali raccolta e regolare i propri spazi di conseguenza. Uno dei fattori condizionanti la produttività agraria (e dunque la produzione) è inoltre l'umidità del terreno. Anche questo valore non è noto (anche perché viene aggiornato in seguito) nel momento in cui viene scelta la specie più idonea da seminare. Gli agenti sono tuttavia in grado di fare una previsione considerando l'umidità stagionale dell'anno precedente e l'umidità della stagione appena trascorsa, e dunque di scegliere (entro la

tipologia adatta alla stagione, “microterme” o “macroterme”) la specie cerealicola che verrà coltivata in loco.

4.3.6. Interazione

Come già menzionato, gli agenti all'interno del sistema in parte rappresentano sia la presenza dell'uomo in diverse forme di aggregazione (i siti o *sites* per le comunità degli insediamenti, le *households* per i gruppi familiari), sia l'ambiente che li circonda sottoforma di *patch*. Dalla loro presenza nei processi e dalla loro definizione attraverso specifici attributi deriva una serie di interazioni di tipo uomo-uomo, ambiente-uomo e ambiente-ambiente che coinvolgono in modo diverso ciascuna o più di queste categorie di agenti. In generale, in AMPBV SIMULATOR i processi più di aggiornamento demografico prevedono un'azione principale delle *households*, i processi di scambio sono dominio dei siti e i processi di produzione riguardano i siti e le loro *patch*.

- Interazioni *household-household*. La sola forma di interazione che coinvolge esclusivamente i singoli gruppi familiari è definita dai rapporti matrimoniali (processo *manage-marriages*), che comportano l'allontanamento (attraverso la modifica degli attributi tabellari *family* e *x-family-clock*) di due giovani adulti dalle rispettive unità familiari per andare a costituirne una nuova. Il processo si attiva ogni qualvolta siano presenti due *household* in cui sono conteggiati due giovani adulti (in cui cioè è già presente un altro adulto del medesimo sesso e di età superiore) di sesso opposto.
- Interazioni *households-site*. Queste due categorie agenziali sono strettamente legate da un rapporto gerarchico e di reciproca dipendenza che determina il loro benessere e le loro sorti, tuttavia *household* e siti non hanno interazioni dirette all'interno del modello se non durante la precedente descritta fase di migrazione, in cui le famiglie possono “sottrarsi” al sito di origine (se ancora esistente) e andare ad ampliare la popolazione del sito di destinazione.
- Interazioni *site-site*. I siti interagiscono con altri siti all'interno del processo di scambio. Le operazioni previste in tale processo, che coinvolge sempre solamente due agenti per volta, comportano il trasferimento reciproco di beni alimentari, metallo o lavoratori da un'entità all'altra. Lo scambio avviene in base alla scelta di un sito del proprio partner commerciale, e può essere più o meno fruttuoso per una o entrambe le

parti. Ad attestare il buono o cattivo esito dello scambio è il valore del *link* relazionale che connette i due agenti.

- Interazioni *site-patch*. Diversamente dalle household, i siti interagiscono non solo tra di loro, ma anche con l'ambiente circostante, in particolare con le patch di cui si "appropriano" per sostenersi. I siti assumono il controllo delle patch espandendo il proprio bacino di approvvigionamento, e determinano quello che ne sarà il comportamento confermando o modificando la loro identità (attributo *identity*). Le patch operano di conseguenza per ottimizzare la propria produzione specifica, il cui risultato sarà utilizzato o accumulato dal sito di appartenenza.

4.3.7. Stocasticità

Dato il grande numero di fattori e di livelli di incertezza presenti nel modello, il codice contempla un'importante presenza di componenti stocastiche che appartengono ad una serie di processi qui brevemente riportati.

- *Plan-production*. Esclusivamente in fase di *setup*, per distribuire gli spazi coltivati dai siti con maggior verosimiglianza, il valore *charge* delle patch destinate all'agricoltura (*crops*) è assegnato casualmente.
- *Set-X-season*. All'inizio di ogni ciclo, con il cambio di stagione vengono anche fissati parametri ambientali di piovosità e temperatura. Le variazioni di temperatura sono costrette in un range che viene regolato dall'utente nell'interfaccia mediante la *slider temperature-oscillation-range*; l'oscillazione può essere (sempre secondo una determinazione random) positiva o negativa rispetto al valore di riferimento. Per quanto riguarda la piovosità, il valore stagionale oscilla secondo una distribuzione di probabilità di Poisson. L'intento in questo caso è mantenere valori abbastanza stabili, che possono comunque essere modificati discrezionalmente (sempre attraverso l'interfaccia) imponendo alterazioni climatiche più impattanti.
- *Compute-productivity*. Per limitare un calo di produzione eccessivamente drastico dato da un'eventuale siccità (la presenza nella lista *productivity* di un valore di pari a 0, come si menziona nella descrizione in dettaglio del processo, comporta la totale perdita della coltura), se l'umidità del suolo (*soil-moisture*) dovesse avere come valore 0, viene data alla coltura una possibilità del 50% di sopravvivere con un valore di produttività minimo.

- *Harvest*. La produttività agricola di una *patch* coltivata (calcolata nel processo *compute-productivity* in base a fattori sia antropici che ambientali, cfr. *infra*) consiste in un valore intero compreso tra 0 e 6. La tabella *crop-production_Kg/ha* include dei valori medi di produzione (regolati dall'utente) per ogni specie di cereali. Questi valori sono impiegati nel sottoprocesso *harvest* per il calcolo delle quantità di raccolto per ettaro in diverse circostanze di produttività: con un grado di produttività (*productivity*) medio (3 o 4) la quantità viene determinata stocasticamente entro un range compreso tra il valore di riferimento moltiplicato per $2/3$ e lo stesso moltiplicato per $4/3$. Con *productivity* pari a 5 e a 6, il range in cui viene estratto il valore di produzione è compreso rispettivamente tra $4/3$ e $5/3$ e tra $5/3$ e il doppio del valore di riferimento; analogamente, con *productivity* uguale a 2 o 1 il valore di produzione apparterrà ad un range tra $1/3$ e $2/3$ del valore di riferimento e ad un range tra $1/3$ e 0.
- *Consume-forest*. Il fabbisogno di legname stabilito per ogni comunità nel processo di consumo dipende dalla quantità di gruppi familiari presenti al suo interno e dalla stagione in corso, ma è anche regolato da un coefficiente determinato stocasticamente (*random-poisson*) tra un valore minimo 0 e un valore massimo 0,5.
- *Update-x-deceases*. La probabilità di decesso per ciascuna fascia di età all'interno delle famiglie è determinata secondo una funzione di distribuzione "a vasca da bagno" (*bathtub distribution*, per cui si rimanda, per una spiegazione in maggior dettaglio, alla descrizione del processo *update-population* e dei suoi sottoprocessi). Il valore di probabilità determinato secondo tale funzione è portato ad un valore intero (moltiplicandolo per 100); per mantenere il rapporto percentuale, la successiva estrazione stocastica avviene quindi entro un range che va da 0 a 40000 (il valore 10000 è moltiplicato per 4 tenendo conto della scansione stagionale).
- *Kill-one-X*. Sempre all'interno del processo di aggiornamento demografico è presente il sottoprocesso che comporta l'effettiva rimozione di un membro familiare appartenente ad una *household*. Il genere del componente eliminato è tendenzialmente selezionato in modo da mantenere un equilibrio tra i due sessi; nel caso, tuttavia, che il numero di maschi appartenenti alla fascia di età colpita sia uguale a quello delle femmine, il genere è estratto casualmente (*one-of* "male" "female"). Se all'interno della stessa categoria di genere e fascia di età sono inoltre presenti più elementi, lo

specifico individuo viene a sua volta selezionato casualmente all'interno della lista corrispondente.

- *Generate-a-child*. Quando la comunità si moltiplica, il sesso dei nascituri è determinato in maniera stocastica.
- *Update-sites*. Nell'eventualità che una household sia costretta alla migrazione, questa abbandona il sito e viene ricollocata temporaneamente in una cella a caso (non appartenente a siti), in attesa di un'eventuale possibilità di trasferimento.

4.3.8. Osservazione

Come già menzionato, ciò che si attende dal modello è un fenomeno di collasso nelle sue potenziali cause e nelle sue modalità. Verrà pertanto osservato:

- Se ciò si verifica in maniera progressiva o repentina
- Se è sufficiente un fattore di stress a generare un crollo sistemico (e in caso affermativo di che intensità dev'essere per manifestarsi con conseguenze apprezzabili) o se il motore della crisi è da individuarsi in una concomitanza di fattori.
- Se i fattori scatenanti la crisi sono prevalentemente di natura endogena (emergenti dalla presenza degli agenti e dal loro comportamento) oppure esogena (fattore di stress indotto)
- Se è apprezzabile un collasso globale oppure "selettivo", e in tal caso quali sono i fattori o le caratteristiche agenziali che ne hanno determinato il successo o l'insuccesso.
- L'eventuale ruolo tutelativo di un buon potenziale all'interno del network di scambi, oppure, viceversa, l'impatto negativo dell'isolamento.

4.3.9. Interfaccia di controllo

L'ampia gamma di parametri discrezionali all'interno del modello impone anche, in questa sede, una breve descrizione dell'interfaccia grafica con la quale l'utente può interagire non solo per avviare e osservare l'effetto dei processi nell'universo simulato, ma anche per regolare una serie di valori determinanti per l'esito dell'esperimento.

Generali. Alla destra della schermata sono presenti i pulsanti che avviano le due procedure fondamentali *setup*, con cui viene inizializzato il sistema e *go*, con cui viene avviato il ciclo. Nel secondo caso è prevista la reiterazione automatica, e per interrompere lo svolgimento

della simulazione è sufficiente un secondo click. Al di sotto si trovano due pulsanti che permettono di visualizzare o meno le “etichette”, nel caso specifico i nomi degli agenti-sito e i *link* relazionali tra essi. E’ inoltre possibile monitorare la stagionalità e gli anni trascorsi attraverso due apposite finestre di controllo.

Osservazione. Al di sotto della finestra di visualizzazione sono presenti due finestre di monitoraggio della presenza diacronica dei siti e della popolazione totale nel sistema. E’ inoltre predisposto un menù a tendina (*chooser*) con cui selezionare un sito in particolare di cui si vuole tenere controllati parametri specifici (popolazione locale ed estensione della *catchment-area*). La *slider* “survivors” serve invece ad imporre al sistema il numero di siti presenti al momento in cui si desidera mettere automaticamente la simulazione in standby.

Risorse. Alla destra dell’interfaccia di comando sono state predisposti gli strumenti (*slider* e *switch*) con cui è possibile regolare i parametri di sistema o imporre specifiche condizioni. Sotto “resources” sono raggruppate le regolazioni della capacità produttiva (*X-production*) media di ogni specie cerealicola contemplata nel modello, la quantità di lavoratori ideali per il mantenimento delle celle coltivate (*crop-maintenance*), il livello massimo di fertilità del suolo (*max-soil-fertility*), il coefficiente per il calcolo (*al setup*) dell’area boschiva residua (*forest%*), la quantità di foresta in ettari necessaria al consumo di legna da ardere (*firewood*) e la quantità di pascolo prevista proporzionalmente al numero di popolazione in ciascun sito (*pastures-per-population*).

Clima. In questa sezione sono regolabili il livello della falda freatica *watertable* (in partenza, o anche nel corso della simulazione), il parametro di riferimento (*reference-precipitations*) con cui comparare le precipitazioni stagionali e determinare un abbassamento (piovosità al di sotto del valore) o innalzamento della falda. Sono inoltre presenti due *switch* per imporre un’eventuale siccità (*drought*) o eccesso di umidità (*extra-rainfall*), il cui effetto è regolabile con le rispettive *slider* (*drought-coefficient* o *extra-rainfall-coefficient*).

Sopravvivenza. I parametri regolabili in questo settore dell’interfaccia riguardano la capacità di sopravvivenza degli agenti, dunque la riserva alimentare di cui i siti sono dotati al setup (*initial-food-reserve*), le due soglie di “affamamento” (*hunger-threshold*) che impongono la migrazione delle *households* dai siti maggiormente in crisi, e un coefficiente con cui s’impone al sistema una serie di fallimenti nella produzione di una desiderata percentuale di patch (*calamity-coefficient*).

Population L'ultima sezione dell'interfaccia riguarda i parametri più specificamente demografici, in particolare: la quantità di popolazione per ogni ettaro di abitato (*initial-population/ha*), il rapporto tra tasso di mortalità e natalità (*population-increase*), l'età media alla morte (*mean-death-age*) e il criterio secondo cui le households “stressate” dall'affamamento scelgono il sito in cui migrare (*migration*).

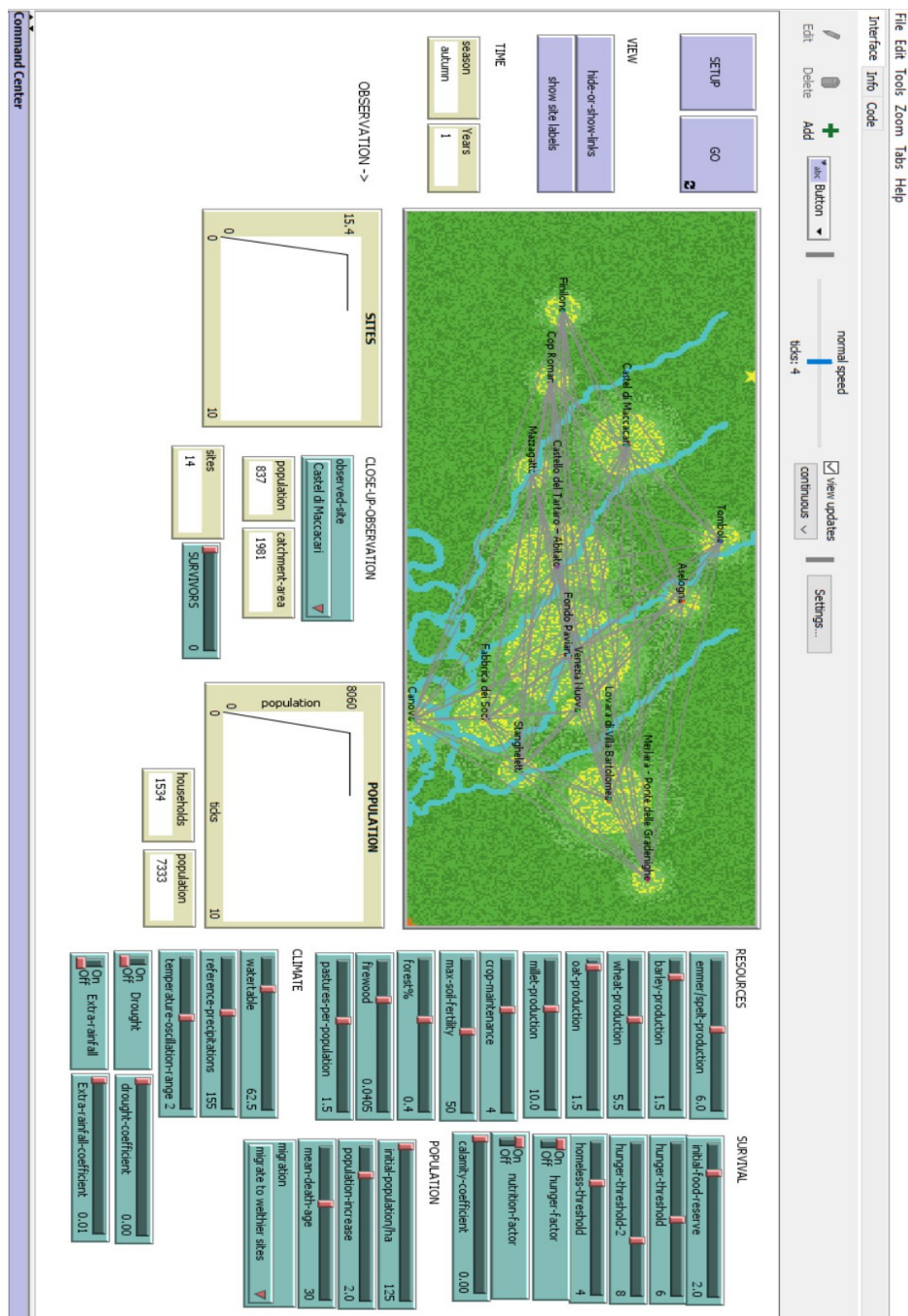


Fig. 23. Interfaccia di controllo del modello in Netlogo.

4.4. Dettagli

4.4.1. Inizializzazione

Lo scenario di partenza della simulazione corrisponde al “culmine” della parabola terramaricola nelle Valli Grandi Veronesi Meridionali, alla fase, cioè, in cui

- è presente la maggior concentrazione insediativa di tutto l’arco dell’età del Bronzo
- gli assetti *intra-polity* tra gli insediamenti riflettono un livello massimo di distribuzione gerarchizzata del potere
- La distribuzione delle risorse territoriali, conseguentemente alle precedenti dinamiche insediative nell’area, risulta già in parte ridimensionata o compromessa
- Contestualmente allo sviluppo del sistema insediativo, un eccezionale incremento demografico aveva moltiplicato esponenzialmente la presenza antropica nell’area.

La prassi di inizializzazione (*setup*) è costituita, per il modello AMPBV SIMULATOR, da una sequenza piuttosto complessa di processi e sottoprocessi, in quanto consiste nell’articolazione del sistema in tutte le sue entità, dunque:

- la predisposizione dell’ambiente virtuale, avente componenti di base caratterizzate da variabili specifiche,
- la generazione di una popolazione di agenti eterogenea, appartenenti a diverse categorie gerarchiche e associati a diverse funzionalità,
- la “messa a regime” del sistema, in cui la determinazione di un certo numero di variabili (fondamentali per il regolare il modello per la procedura GO) richiede la reiterazione preliminare di alcuni processi e sottoprocessi

Vengono in sintesi predisposti ambiente, agenti e regole del modello, secondo un ordine che permette di inserire questi elementi con i rispettivi attributi e di renderli operativi per la simulazione.

Predisposizione dell’ambiente. La costruzione dell’ambiente in AMPBV SIMULATOR è la sequenza di comandi in assoluto più onerosa in termini computazionali, in quanto comporta il caricamento di una grande quantità di dati all’interno dell’*universo*, con cui s’intende, in termini di Agent-based Modeling, il “mondo artificiale” entro cui opereranno gli agenti e in particolare, nel nostro caso, gli insediamenti o *sites*. La derivazione, da parte degli agenti statici, delle variabili spaziali dai dati mappali di input impone purtroppo tempi di caricamento non indifferenti a cui, al momento, non è stato possibile rinunciare nella

programmazione. In questa prima fase le *patch*, in quanto unità spaziali attive dotate di attributi specifici, vengono definite mediante una successione di processi: al caricamento delle mappe segue il settaggio dei parametri ambientali di base, ovvero parametri climatici e pedologici. I processi coinvolti in tale operazione sono:

- *load-DTM*
- *load-soil-map* e *set-soil-parameters*
- *load-season-maps* e *set-patch-climate*

Tramite l'estensione pre-integrata *NetLogo GIS*, che consente di inserire e manipolare formati standard di dati georeferenziati sia in formato *raster* che vettoriale, vengono innanzitutto inseriti, per ogni *patch*, i parametri più espressamente “territoriali”: il valore di quota sul livello del mare, derivato dal modello digitale del terreno (processo *load-DTM*) e la classe tessiturale acquisita dalle mappe regionali.

Si riporta, a scopo esemplificativo dell'integrazione GIS dei dati mappali, il processo di caricamento del Digital Terrain Model:

```
to load-DTM
  gis:load-coordinate-system "DTM.prj"
  set elevation gis:load-dataset "DTM.asc"
  gis:set-world-envelope-ds gis:envelope-of elevation
  gis:apply-raster elevation altitude
  file-close
  ask patches [
    set altitude precision altitude 1
    set pcolor scale-color grey altitude 0 30
    set DTMcol pcolor ]
end
```

Nel caso delle quote (attributo *altitude*) e delle tessiture (*soil-texture*), i valori inseriti durante l'inizializzazione rimarranno invariati a prescindere dagli eventi che possono aver luogo nel corso della simulazione. La categoria di attributi, per così dire, ambientali associati a fattori meteorologici deriva i suoi valori da una serie di livelli mappali (le “*season-maps*”), ciascuno corrispondente, per ogni stagione, ai seguenti fattori: piovosità, temperatura media, temperatura minima e massima. Tali valori costituiscono il riferimento da cui, ad ogni avvicendamento stagionale (processo *set-new-season*), verranno assegnati stocasticamente alle *patch* valori differenziati.

Settaggio delle turtles. Non solo le *patch*, ma anche gli agenti a coordinate variabili, le *turtles*, necessitano di alcune procedure preliminari che ne definiscano, innanzitutto, la collocazione all'interno dell'universo. La distribuzione dei cosiddetti "agenti-sito" o *sites*, in particolar modo, dipende a sua volta da un'integrazione GIS del database predisposto per la simulazione. Il processo *load-sites* non solo carica il dato vettoriale georeferenziato, ma ingloba anche un sottoprocesso per definire i parametri di visualizzazione di base (*display-sites*) e un sottoprocesso di impostazione degli "agenti-famiglia" o *households*, i quali vengono generati in corrispondenza spaziale dei vari siti e in numero proporzionale alla quantità di popolazione di questi ultimi. Nel processo di caricamento dei siti ne vengono definiti forma, coordinate, nome, quantità di popolazione ed estensione, non solo dell'area insediativa, ma anche del bacino di approvvigionamento o *catchment-area*.

```
to display-sites
  foreach gis:feature-list-of dataset [
    vector-feature ->
    create-sites 1 [
      set shape "circle" set size 2
      set xcor gis:property-value vector-feature "Xabm"
      set ycor gis:property-value vector-feature "Yabm"
      set name gis:property-value vector-feature "NOME"
      set site-area gis:property-value vector-feature
"ESTENSIONE" ; e così via per tutti i valori in tabella
      set population round (site-area * initial-
population/ha)
      set crops population * 0.5
      set pastures population * 1.5
      set forest population
    ]
  ]
end
```

Per quanto riguarda invece l'impostazione delle *households*, questa categoria di turtles viene direttamente generata, durante l'inizializzazione, dai siti. Ogni *site* colloca nel proprio spazio (nella propria *patch*) un numero di *households* proporzionale al valore del proprio attributo *population* (popolazione), e le vincola a sé stesso tramite il proprio attributo *my-households* (ovvero l'*agentset* di unità familiari di appartenenza) e tramite *my-home*, attributo delle *households* che ne indica il sito di appartenenza. All'interno dello stesso processo (*setup-households*) vengono predisposti anche gli altri attributi caratterizzanti questi agenti, e in seguito estratto, secondo una procedura *random*, un numero di componenti entro un range da 2 a 9.

```
to setup-households
```

```

ask sites [
  hatch (population / 6) [set breed households]
  set my-households households-here
  ask my-households [
    set my-home myself
    set family table:make
    table:put family "male-infans-a" 0
    table:put family "female-infans-a" 0
    table:put family "male-infans-b" 0
    table:put family "female-infans-b" 0
    table:put family "male-juvenes" 0
    table:put family "female-juvenes" 0
    table:put family "male-adultus" 0
    table:put family "female-adultus" 0
    table:put family "male-adultus" 0
    table:put family "male-maturus" 0
    table:put family "female-maturus" 0
    table:put family "male-seniles" 0
    table:put family "female-seniles" 0
    set m-family-clock table:make
    set f-family-clock table:make
    let family-length one-of (range 2 9)
    run word "setup-family-" family-length
  ]
  update-local-population]
End

```

Il processo *setup-households* sottende due ulteriori tipi di sottoprocessi. In un caso, con il sottoprocesso *update-local-population* (si veda, per una descrizione dettagliata, il paragrafo corrispondente nella sezione Sottoprocessi) gli agenti-sito aggiornano i propri valori demografici in base alle famiglie presenti in loco (*my-households*) e ai rispettivi attributi. Con *setup-family-x* sono denominati una serie di codici scritti per distribuire in maniera, per così dire, “naturale” i membri all’interno delle *households* (a seguire un esempio). L’idea alla base è quella di creare contesti differenziati, in cui il nucleo di partenza è una coppia di adulti, a cui aggregare casualmente altri componenti di fasce di età compatibili. Genere ed età, invece, sono determinati casualmente.

```

to setup-family-6
  table:put family "female-adultus" 1
  table:put f-family-clock 1 one-of (range 25 39)
  table:put family "male-adultus" 1
  table:put m-family-clock 1 one-of (range 25 39)
  repeat 2 [setup-children]
  repeat 2 [setup-older-children]

```

end

I sottoprocessi di livello inferiore *setup-children*, *setup-older-children*, *setup-juvenes-or-maturus*, *setup-elders* sono pertanto funzionali a definire i non-adulti all'interno delle famiglie secondo una selezione di tipo stocastico; i valori risultanti vengono quindi inseriti nelle tabelle-attributo *family* e *m/f-family-clock*. Si riporta di seguito un esempio.

```
to setup-older-children
  let big-child-age one-of (range 6 19)
  let big-child-sex one-of ["female" "male"]
  ifelse big-child-age >= 12
    [table:put family word big-child-sex "-juvenes"
table:get family word big-child-sex "-juvenes" + 1 ]
    [table:put family word big-child-sex "-infans-b"
table:get family word big-child-sex "-infans-b" + 1]
  ifelse big-child-sex = "female"
    [table:put f-family-clock (max table:keys f-family-clock
+ 1) big-child-age]
    [table:put m-family-clock (max table:keys m-family-clock
+ 1) big-child-age]
end
```

Vengono in seguito inizializzati anche i *borders*, selezionando due patch ai margini della mappa in cui vengono generate queste particolari *turtles*, e che vengono identificate, in base alla posizione, con *metal-source* e *metal-demander* (variabili globali).

```
to setup-borders
  ask patch 92 163 [
    sprout 1 [
      set breed borders
      set shape "star"
      set size 10
      set color yellow
      set offer-1 "metal"
      set demand-1 "food"]]
  ask patch 400 0 [
    sprout 1 [
      set breed borders
      set shape "star"
      set size 10
      set color orange
      set demand-1 "metal"]]
  set metal-source max-one-of borders [pycor]
  set metal-demander min-one-of borders [pycor]
end
```


A seguire la creazione degli agenti, il processo *set-site-parameters* ha la funzione di predisporre per l'avviamento alcuni attributi dei siti, in parte fissi (come *my-metal-distance*) e in parte mutevoli, ma che necessitano di un'impostazione preliminare per essere utilizzati nei processi successivi. E' il caso, in particolare, di attributi sottoforma di lista (*hunger*) o di tabella (come buona parte degli attributi utilizzati in fase di scambio: *reserve* e *old-reserve*, *availability* e *necessity*, *offer* e *demand*, *gain* e *loss*, *adjustment*).

Impostazione dei parametri delle colture. Nel setup è prevista, naturalmente, anche l'impostazione di parametri universali o *globals*, a cui tutte le unità agenziali possono fare riferimento. I valori impostati con il processo *set-crop-parameters* sono variabili globali accessibili a tutte le tipologie di agenti, ma di fatto sono utilizzate dalle *patch* e più specificamente dalle patch aventi come identità "*crops*", ovvero quelle coinvolte nel processo di produzione agricola. I parametri in questione riguardano infatti, in prevalenza, le differenti tipologie di colture considerate nel modello: *emmer/spelt*, *wheat*, *barley*, *oat* e *millet*. Si stabiliscono, in questo processo, la loro resa e apporto nutritivo (*crop-productions_Kg/ha*, *crop-energy*) e la loro produttività in base a diversi stati di umidità del terreno (*optimum-moistures*, *soil-moistures*) e diverse temperature (*optimum-T*, *critical-min-T*, *critical-max-T*). Viene in seguito definito, nel processo *set-patch-fertility*, lo stato di fertilità dei suoli (*soil-fertility*), assegnato casualmente entro un range (per non avere in partenza suoli già eccessivamente improduttivi) compreso tra il valore massimo previsto, (regolabile nell'interfaccia) e 1/5 di se stesso; le patch boschive (aventi, cioè, identità "*forest*") hanno invece assegnato un valore massimo, in quanto la loro fertilità non è ancora stata compromessa dalla messa a coltivo.

```
to setup-patch-fertility
  ask patches with [identity != "forest"] [
    set soil-fertility one-of (range (max-soil-fertility /
5) max-soil-fertility)]
  ask patches with [identity = "forest"] [
    set soil-fertility max-soil-fertility]
end
```

Settaggio dell'area boschiva. Alle patch esterne alla catchment-area dei siti, che non hanno ancora una identità assegnata, viene ordinato di divenire foresta oppure prato, in una proporzione che dipende dall'impostazione del parametro *forest%*. Per questa versione preliminare del modello si è accettato di distribuire casualmente la copertura forestale.

Inizializzazione dei processi produttivi. Una volta creati nell'universo i siti e le unità familiari di appartenenza, vengono definite anche le rispettive aree di approvvigionamento ovvero i set di *patch* mediante cui si concretizza l'interazione reciproca agente-ambiente: i siti intervengono sugli spazi di loro pertinenza, modificando in base alle condizioni del momento gli attributi delle patch, e viceversa aggiorneranno i propri (come le riserve locali) conseguentemente al comportamento degli agenti spaziali. La configurazione iniziale prevede quindi che i siti determinino innanzitutto l'area sotto il loro controllo, estendendola proporzionalmente alle dimensioni dell'insediamento e diversificandola (modificandone l'attributo *identity*) in zona agricola (*crops*), di pascolo (*pastures*), boschiva (*forest*) e, se presenti, fluviali (*river*, non produttive ma funzionali alla mobilità). Similmente a quanto visto precedentemente per le *households*, l'appartenenza reciproca tra i siti e le loro *patch* è data dal valore degli attributi *my-site* (per le *patch*) e *my-patches*.

Impostazione dell'umidità dei suoli. Un fattore critico per l'esito della produzione in AMPBV SIMULATOR è lo stato di umidità del suolo, il quale dipende dalle precipitazioni locali, ma soprattutto dal livello della falda freatica. Con il processo *initialize-soil-moistures*, che serve ad impostare i valori di umidità del terreno nelle *patch* (*soil-moisture*, appunto), viene quindi innanzitutto assegnato a tutti gli agenti spaziali un valore iniziale per il livello della falda, regolato dall'utente nell'interfaccia. La fase successiva del processo comporta un primo inserimento di due variabili delle *patch*, *last-year-moisture* e *last-year-previous-moisture*, di cui i siti necessiteranno, in fase di pianificazione della produzione, per la scelta della coltura (processo *choose-crop-type*) più adatta.

```
to initialize-soil-moistures
  ask patches [
    set last-year-previous-moisture table:make
    set last-year-moistures table:make]
  repeat 5 [
    set-new-season
    ask patches [compute-soil-moistures]
    ask patches [
      table:put last-year-previous-moisture season soil-
moisture
      table:put last-year-moistures season soil-moisture]]
  ask patches[compute-soil-moistures]
end
```

La sequenza è conclusa da una prima attivazione dei processi produttivi *plan-production*, *choose-crop-type*, *assign-workers*, *compute-productivity* e *produce-agriculture*, implementati in fase di inizializzazione per garantire ai siti un quantitativo di riserve di base prima di procedere con l'iterazione del ciclo simulativo (procedura *GO*).

Impostazione dei link relazionali. L'inizializzazione di AMPBV SIMULATOR riguarda non solo il processo produttivo, ma anche quello di scambio. In particolare, il processo *setup-relational-links* e il suo sottoprocesso *setup-reputation* consistono nella creazione dei *link* relazionali, i quali indicano il grado di “fidelizzazione” tra i siti per quanto riguarda l'acquisizione di beni da fornitori esterni, e l'assegnazione di un valore di partenza al relativo attributo *reputation* (reputazione). Quest'ultimo viene stabilito secondo la seguente procedura:

- viene calcolato, per ogni categoria di beni, il rapporto tra domanda e offerta di tutti i siti
- i siti stabiliscono un proprio “potenziale di scambio” (attributo *exchange-potential*) sommando i suddetti rapporti (*x-temp-value*)
- i link relazionali settano come valore provvisorio di *reputation* il rapporto tra il valore *exchange-potential* del sito verso cui sono direzionati e la distanza tra quest'ultimo e il sito a cui lo collega.
- Viene calcolata la deviazione standard per l'insieme di valori *reputation* associati a tutti i *relational-links*
- I valori di reputazione vengono, in ultima istanza, riaggiornati come rapporto tra il valore precedente e la deviazione standard

Si riporta qui la procedura così com'è espressa nel codice.

```
to setup-reputation
  let food-total-offer sum [table:get offer "food"] of sites
  + 1
  let food-total-demand sum [table:get demand "food"] of
  sites + 1
  let food-temp-value food-total-demand / food-total-offer

  let metal-total-offer sum [table:get offer "metal"] of
  sites + 1
  let metal-total-demand sum [table:get demand "metal"] of
  sites + 1
```

```

    let metal-temp-value metal-total-demand / metal-total-
offer

    let workers-total-offer sum [table:get offer "workers"] of
sites + 1
    let workers-total-demand sum [table:get demand "workers"]
of sites + 1
    let workers-temp-value workers-total-demand / workers-
total-offer

    ask sites [set exchange-potential
      (table:get availability "food" * food-temp-value) +
      (table:get availability "metal" * metal-temp-value) +
      (table:get availability "workers" * workers-temp-value)
      ask my-in-relational-links [
        let end-2 end2
        let distance-end1-end2 [nw:weighted-distance-to [my-
node] of end-2 "weight"] of [my-node] of end1
        set reputation [exchange-potential] of end1 /
distance-end1-end2]
      ]
    let reputation-unit standard-deviation [reputation] of
relational-links
    ask sites [ask my-in-relational-links [
      ifelse reputation-unit > 0
      [let first-reputation int reputation / reputation-unit
set reputation []
set reputation lput first-reputation reputation]
[set reputation [0]]]]
end

```

Impostazione della rete connettiva. Come già accennato, a definire l'ambiente all'interno di AMPBV SIMULATOR contribuiscono non solo le patch, ma anche una rete di *connective-links* e *nodes*, che agli agenti utilizzano per ponderare le distanze percorse tra un punto e l'altro della mappa. Al setup, quindi, viene originato un network a partire dai nodi, distribuiti a intervalli regolari di 3 patch (anziché ad ogni patch, soluzione pensata per limitare la pesantezza del modello e i conseguenti, già importanti, tempi di caricamento) sia in verticale che in orizzontale. Gli attributi associati ai nodi, *mud?* *water?* e *forest?*, vengono definiti in questa fase e dipendono dalle caratteristiche (umidità del suolo e identità) della patch in cui sono collocati. A partire da ciascuno di questi agenti vengono quindi generati link monodirezionali (i *connective-links*) in collegamento con gli 8 nodi più vicini (in modo da ottenere un link per ogni direzione percorribile). A ciascuno dei collegamenti è attribuito un peso (*weight*) che dipende da tre fattori:

- Il tipo di terreno presente (normale, boschivo o fangoso), rilevato dagli attributi dei due nodi alle estremità
- La differenza di quota (*altitude*) tra la patch del nodo di origine del *link* e quella del nodo di destinazione (*slope*)
- Il verso, che in combinazione con il valore di pendenza definisce il peso complessivo di ciascun collegamento (lo sforzo fisico in salita o in discesa, chiaramente, differisce)

L'informazione relativa al peso dei vari link è nota agli agenti (*siti* e *household*), che quindi, dovendo scegliere una destinazione piuttosto che un'altra in base alla distanza (ad esempio nel processo di scambio), terranno conto dell'effettivo costo di percorrenza. Per attivare questa funzionalità è stata attivata l'estensione *network analysis (nw)*, preintegrata in NetLogo (Wilensky, Rand 2015, p.309), che agevola l'inserimento e la gestione di grafi e che integra l'algoritmo di Dijkstra (Dijkstra 1959). L'algoritmo (detto anche algoritmo del percorso più breve a fonte singola), generato dall'omonimo matematico olandese, fa uso dei pesi degli archi all'interno di un grafo per trovare il percorso che minimizza la distanza totale (in base appunto al relativo peso assegnato) tra un nodo (*sorgente*) e tutti gli altri nodi a cui è connesso. Il grafo relativo ai corsi di percorrenza in AMPBV SIMULATOR viene creato al setup mediante l'implementazione di due processi (riportati di seguito): *setup-weights*, in cui vengono impostati i coefficienti di pendenza⁴⁶ (valore fisso dei *connective-links*, *slope-coefficient*), e *update-weights*, in cui sono calcolati gli effettivi pesi in base alla tipologia di terreno presente.

```
to setup-weights
  ask connective-links [
    let slope% [[altitude] of patch-here] of end1 +
    [[altitude] of patch-here] of end2
    set slope slope% * 90 / 100]
  ask connective-links with [slope >= 0 and slope < 0.05][
    set slope-coefficient 1]
  ask connective-links with [slope < 0 and abs slope >=
0.05 and abs slope < 0.15][
    set slope-coefficient 0.5]
  ask connective-links with [slope < 0 and abs slope >=
0.15 and abs slope < 0.25][
    set slope-coefficient 0.8]
  ask connective-links with [slope < 0 and abs slope >=
0.25 and abs slope < 0.35][
```

⁴⁶ Per pendenze proibitive, superiori a 45°, viene assegnato arbitrariamente un valore molto alto (100) in modo da rendere il tratto in questione non competitivo nella scelta del percorso.

```

        set slope-coefficient 1.3]
    ask connective-links with [slope < 0 and abs slope >=
0.35 and abs slope < 0.45][
        set slope-coefficient 1.95]
    ask connective-links with [slope < 0 and abs slope >=
0.45][
        set slope-coefficient 100] ; -> pendenza proibitiva
    ask connective-links with [slope > 0 and slope >= 0.05
and abs slope < 0.15][
        set slope-coefficient 1.85]
    ask connective-links with [slope > 0 and slope >= 0.15
and abs slope < 0.25][
        set slope-coefficient 3.95]
    ask connective-links with [slope > 0 and slope >= 0.25
and abs slope < 0.35][
        set slope-coefficient 5.9]
    ask connective-links with [slope > 0 and slope >= 0.35
and abs slope < 0.45][
        set slope-coefficient 8]
    ask connective-links with [slope > 0 and slope >= 0.45][
        set slope-coefficient 100]
    update-weights
end

```

4.4.2. Dati e fonti di riferimento

L'elevato livello di complessità del modello, il quale si riflette in un grande numero di processi implementati, ha comportato, contestualmente, anche la definizione di molteplici variabili di riferimento. Per la definizione di tali variabili sono stati sfruttati dati di carattere multidisciplinare e diversa tipologia, in particolare: dati spaziali georeferenziati, sia in formato immagine che in forma di database relazionale; dati generali (stime o statistiche) derivati dalla letteratura pertinente il caso in esame o contesti confrontabili; parametri biologici (come crescita vegetativa o fabbisogno nutrizionale) di riferimento adeguati a quanto noto degli "attori" in causa nel loro contesto storico e geografico.

Parametri spaziali e dati mappali

L'obiettivo di produrre un modello agenziale di tipo spaziale ha comportato, da una parte, la necessità di definire l'ambiente (che per questa tipologia di modelli coincide tipicamente con lo spazio) utilizzando più parametri descrittivi e funzionali per gli agenti statici ("agenti-patch"). E' stato anche, d'altro canto, necessario collocare all'interno di questo ambiente gli "agenti-turtle" (*sites, households*), stabilendo la loro posizione in base alla

presenza fisica delle entità rappresentate nel loro reale contesto geografico. Per la definizione dell'ambiente si è provveduto, innanzitutto, all'acquisizione e parziale rielaborazione di mappe tematiche specifiche, relative, in particolare, a:

- le quote superficiali del terreno, per le quali è stato utilizzato il Digital Terrain Model (DTM) in formato raster fornito dalla Regione Veneto (<https://idt2.regione.veneto.it/>)
- le tessiture dei suoli entro il primo metro di profondità, per cui sono stati utilizzate le mappe vettoriali disponibili presso i geoportali delle regioni Veneto e della regione Lombardia (<https://www.geoportale.regione.lombardia.it/>).
- Mappe climatiche contenenti valori di riferimento per le temperature e le precipitazioni stagionali

Quote del terreno. L'impiego di un modello digitale del terreno derivato dalle quote attuali comporta, naturalmente, l'accettazione di un valore di riferimento indicativo e consapevolmente inaccurati. L'utilizzo di quote recenti è tuttavia reso necessario da un'inevitabile carenza informativa, se non per aree molto contenute e circoscritte, di norma, a saggi di scavo o per carotaggi presso aree archeologicamente sensibili. Si è scelto quindi di accettare come "approssimazione" le quote contemporanee per l'intero areale, non solo per l'oggettiva difficoltà di reperire tutti i dati di scavo (talora inediti) in questione, ma anche per evitare, con un'eventuale combinazione di dati antichi e moderni, di produrre artefatti che avrebbero compromesso anche maggiormente la simulazione. E' stato possibile, tuttavia, escludere dalla mappa una serie di elementi spaziali senz'altro riferibili ad epoche più recenti. Anziché impiegare la modalità semi-automatica di epurazione messa a punto per l'area che ingloba il costruito SAM (cfr. Balista 2016, cfr *supra*), più adatta per un impiego locale e su supporti più ad alta risoluzione, gli elementi appartenenti al "rumore di fondo" (strade e canalizzazioni moderne, tracciati rettilinei visibili e l'attuale corso del fiume Adige) sono state localizzate ed eliminate manualmente, ma sempre all'interno dell'ambiente GIS. L'operazione, nello specifico, ha comportato le seguenti procedure:

- individuazione mediante analisi autoptica delle *features* moderne e tracciamento delle stesse sottoforma di elementi vettoriali lineari
- abbassamento della risoluzione del DTM da 5 m a 100 m, adeguando il dato alla risoluzione spaziale del modello simulativo e riducendo in questo modo i tempi di processamento

- buffering degli elementi vettoriali proporzionato all'ampiezza delle feature da eliminare
- estrazione delle porzioni di DTM corrispondenti agli elementi vettoriali
- Conversione dei dati raster (DTM integrale e le sue porzioni precedentemente estratte) in punti quotati
- Sottrazione dei punti quotati del DTM parziale al DTM integrale, ottenendo una mappa di punti epurata dalle features recenti
- Interpolazione dei punti del DTM epurato

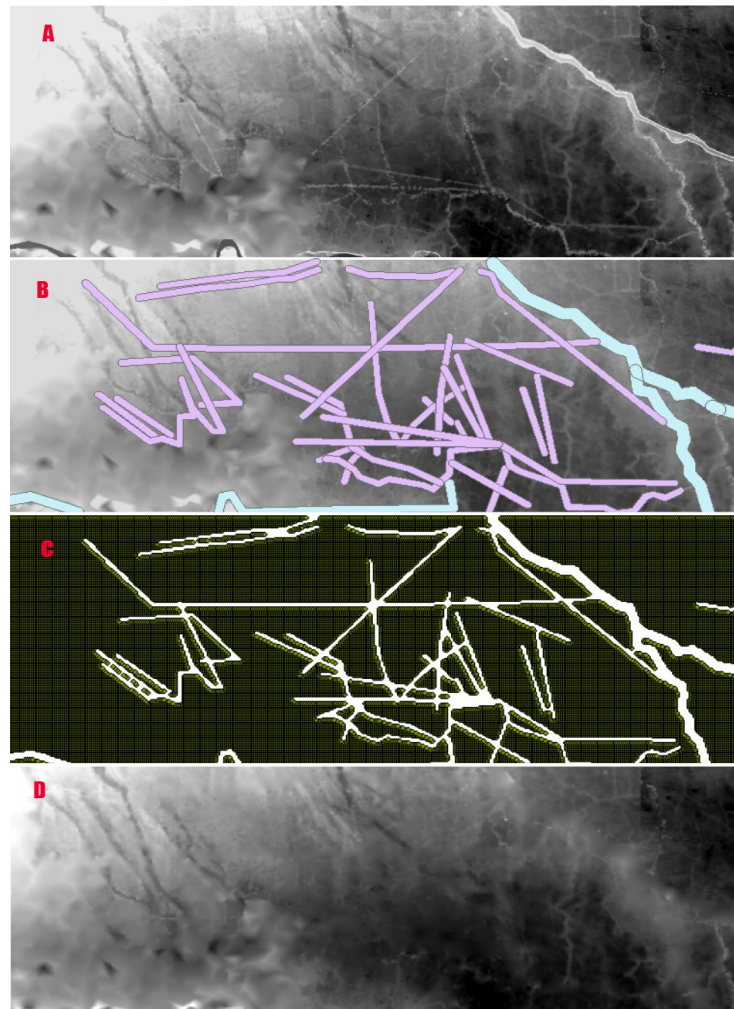


Fig.24. Fasi principali di elaborazione del DTM (A): tracciamento e buffering delle features da eliminare (B); rimozione elementi e conversione in point feature del dato epurato (C); risultato finale (D).

Tessitura dei suoli. Sono state assegnate ad ogni unità spaziale le denominazioni tessiturali del suolo derivate dalle mappe pedologiche acquisite dai geoportali regionali, le quali sono state combinate in un'immagine raster unitaria. Gli attuali suoli esposti sono l'esito di reiterate opere di livellamento a scopo edilizio e agricolo, e i livelli stratigrafici attribuibili all'età protostorica, pur non escludendo alterazioni dovute a processi post-deposizionali chimici e fisici nell'arco di millenni, risultano affioranti in molti dei contesti archeologici indagati. Sono significative la distribuzione di materiale in superficie, oltre che le osservazioni effettuate nel corso di indagini sul campo; le ultime campagne esplorative effettuate dal gruppo AMPBV presso Castello del Tartaro hanno dato ulteriore conferma in questo senso.

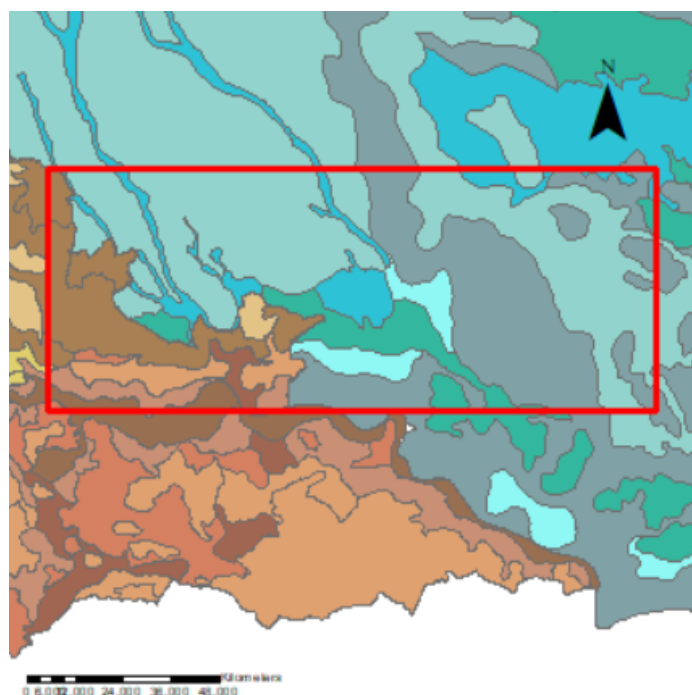


Fig.25. Unione mappe pedologiche di Veneto e Lombardia. Con il riquadro rosso è indicata l'area di indagine.

Le mappe integrate forniscono informazioni di carattere generale, suddividendo il territorio in base alle classi di tessitura del suolo presenti nell'area di indagine. Per derivare da questo dato i valori pedologici ai fini della simulazione è stato preso come riferimento un valore medio per ogni classe, derivando da questo le relative proprietà idrologiche.

TESSITURA	PESO SPECIFICO (g/cm ³)	PUNTO DI APPASSIMENTO (g/100g)	CAPACITA' DI CAMPO (g/100g)	PUNTO DI SATURAZIONE (cm ³ /cm ³)
Franca	1,32	11,52	24,42	0,47
franco-argillosa	1,27	13,68	28,62	0,5
franco-limosa	1,24	14,48	30,39	0,47
franco-limosa-argillosa	1,19	16,96	35,17	0,52
franco-sabbiosa	1,44	6,92	15,29	0,41
argillosa-limosa	1,15	18,63	38,4	0,54
sabbiosa	1,51	3,74	8,98	0,36
argillosa-limosa	1,17	18,44	37,81	0,56

Tab. 2 Tessiture dei suoli associate ai rispettivi parametri di riferimento per il calcolo dell'umidità del suolo e della produttività agricola

Mappe climatiche. I valori relativi al clima (precipitazioni e temperatura) all'interno di AMPBV SIMULATOR sono stati acquisiti da mappe tematiche prodotte nell'ambito del progetto internazionale PaleoClim, a disposizione gratuitamente sul relativo portale online e concepiti proprio per la creazione di modelli simulativi spaziali. I dati, riferiti a macro-scansioni temporali, derivano da modelli paleoclimatici basati sulla circolazione atmosferica planetaria e oceanica, e più precisamente dalla versione HadCM3 del modello di circolazione generale (GCM) del Met Office Unified Model del Regno Unito e dal Community Climate System Model (CCSM) del National Center for Atmospheric Research (NCAR). Si tratta di una modellistica complessa, ma allo stato attuale ampiamente collaudata da oltre 20 anni, che ha contribuito anche agli ultimi tre rapporti di valutazione dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). I modelli GCM in grado di riprodurre le principali circolazioni sia nell'atmosfera che nell'oceano, così come i principali fattori di variabilità interannuale. Il lavoro è nato dalla necessità di disporre di parametri climatici utilizzabili a scale temporali ridotte (annuali o secolari), in modo da poter essere efficacemente impiegati anche in simulazioni biologiche (Fordham et al. 2017), per poter quantificare, ad esempio, la risposta di sistemi o di organismi viventi a cambiamenti ambientali, osservare le dinamiche caratterizzanti di tali cambiamenti (Sandel et al. 2011) e determinare le loro implicazioni ecologiche ed evolutive (Rosauer, Jetz 2015, Weigelt et al. 2016). I dati sono ridimensionati mediante il metodo Change-Factor, con cui è stato possibile creare livelli ad alta risoluzione calibrati a partire da un confronto con i parametri climatologici attuali. Uno dei principali

vantaggi di Change-Factor rispetto ad altri metodi di *downscaling* è la sua capacità di cogliere cambiamenti climatici entro gradazioni topografiche anche modeste (ad esempio nelle regioni montuose, come le differenze tra le valli, le gamme di media altitudine e i loro picchi). La risoluzione spaziale delle mappe PaleoClim è tale da poter cogliere variazioni climatiche locali anche all'interno di un'areale di modesta estensione come quello delle Valli Grandi Veronesi meridionali. Per quanto riguarda la risoluzione temporale, il dato è inevitabilmente assai meno specifico: il periodo di riferimento da cui derivano le mappe impiegate nel presente lavoro corrisponde all'intera fase geologica del Meghalayan (4,2-0,3 ka). I livelli disponibili (aventi formato raster GeoTiff e proiezione WGS 1984) includono variabili bioclimatiche relative a temperature (medie, minime e massime) e precipitazioni annuali, stagionali (o più precisamente, trimestrali) e mensili, ottenute con la procedura di generazione WorldClim che sfrutta la funzione 'biovars' del pacchetto R. Per la simulazione in AMPBV SIMULATOR sono stati selezionati i seguenti livelli:

- La temperatura media del trimestre più caldo ($^{\circ}\text{C} \cdot 10$, livello "Bio_10"), corrispondente, nel nostro caso, alla stagione estiva
- La temperatura media del trimestre più freddo ($^{\circ}\text{C} \cdot 10$, livello "Bio_11"), ovvero la stagione invernale
- Temperatura massima del mese più caldo ($^{\circ}\text{C} \cdot 10$, livello "Bio_5"), identificabile con la temperatura massima della stagione estiva
- Le precipitazioni medie annuali (mm/anno, livello "Bio_12")⁴⁷
- Le precipitazioni totali nel trimestre più umido (mm/trimestre, livello "Bio_16"), che per il contesto d'indagine si è fatta coincidere con la stagione autunnale
- Le precipitazioni totali nel trimestre più caldo (mm/trimestre, livello "Bio_18), quindi l'estate
- Le precipitazioni totali nel trimestre più freddo (mm/trimestre, livello "Bio_19"), ossia l'inverno

Le mappe sono state importate in ambiente GIS e da esse sono state estratte mappe locali relative all'area di studio. Necessitando di dati da poter associare a tutte le stagioni, nonché delle temperature minime e massime stagionali per il calcolo dei valori di evapotraspirazione

⁴⁷ Livello non integrato all'interno del modello, ma utilizzato per stimare le precipitazioni nella stagione primaverile (Bio_PS).

(cfr *infra*) sono stati anche derivati ulteriori livelli climatici tramite semplici operazioni di algebra mappale:

- Media stagionale primaverile ($^{\circ}\text{C} \cdot 10$, livello “Bio_TS”), calcolata da una media delle temperature estive e invernali.

$$Bio\_TS = (Bio11 + Bio10) / 2$$

- Temperatura minima estiva ($^{\circ}\text{C} \cdot 10$, livello “Bio_min_SU”), stimata in funzione della temperatura media e massima nel trimestre più caldo.

$$Bio\_min\_SU = Bio\_10 - (Bio\_5 - Bio\_10)$$

- Temperatura minima autunnale ($^{\circ}\text{C} \cdot 10$, livello “Bio_min_A”) e primaverile ($^{\circ}\text{C} \cdot 10$, livello “Bio_min_SP”) ricavate da una media della minima estiva e della minima invernale.

$$Bio\_min\_A = Bio\_min\_SP = (Bio\_min\_SU + Bio\_6) / 2$$

- Temperatura massima invernale ($^{\circ}\text{C} \cdot 10$, livello “Bio_max_W”), calcolata in funzione della temperatura media e minima invernale.

$$Bio\_max\_W = Bio\_11 - (Bio\_11 - Bio\_6)$$

- Temperatura massima primaverile e autunnale ($^{\circ}\text{C} \cdot 10$, livelli “Bio_max_SP” e “Bio_max_A”), derivate da una media tra la massima invernale e la massima estiva.

$$Bio\_max\_SP = Bio\_max\_A = (Bio\_max\_W + Bio\_5) / 2$$

- Le precipitazioni totali in primavera (mm/trimestre, livello “Bio_PS”), ottenute sottraendo al totale di precipitazioni annuali la somma delle precipitazioni nelle altre stagioni.

$$Bio\_PS = Bio\_12 - (Bio\_8 + Bio\_11 + Bio\_10)$$

Paleoidrografia. Una mappatura completa ed esaustiva delle idrografie coeve alla presenza degli insediamenti terramaricoli in tutto il territorio delle Valli Grandi Veronesi non è purtroppo ancora disponibile, sono tuttavia editi diversi studi geologici che hanno consentito di ampliare la conoscenza dell’area anche sotto questo aspetto e di tentare, per il presente lavoro, una ricostruzione. La mappa idrografica creata per il modello consiste in un file vettoriale (prodotto con l’applicazione GIS Esri ArcMap) elaborato ritracciando:

- l’antico corso del Po di Adria, intercettato dall’area di indagine (Po di Adria Ancestrale o “Po di Adria 1”, cfr Balista 2013, Balista 2018), che durante il Bronzo

Finale si sarebbe spostato verso l'area meridionale più depressa, evolvendosi in un corso più rettilineo e di portata maggiore.

- il cosiddetto “Tartaro Basso”, il cui corso era attivo precedentemente alla divagazione del Po
- le tracce dei coevi corsi fluviali delle principali idrografie orientate nord-sud che solcavano l'areale nel Bronzo Recente, associabili ad antichi corsi di Menago, Tione e Tregnone.

E' indubbio che fossero presenti nell'area ulteriori, probabilmente numerose idrografie minori, il cui corso nell'epoca in esame non è tuttavia ancora noto.

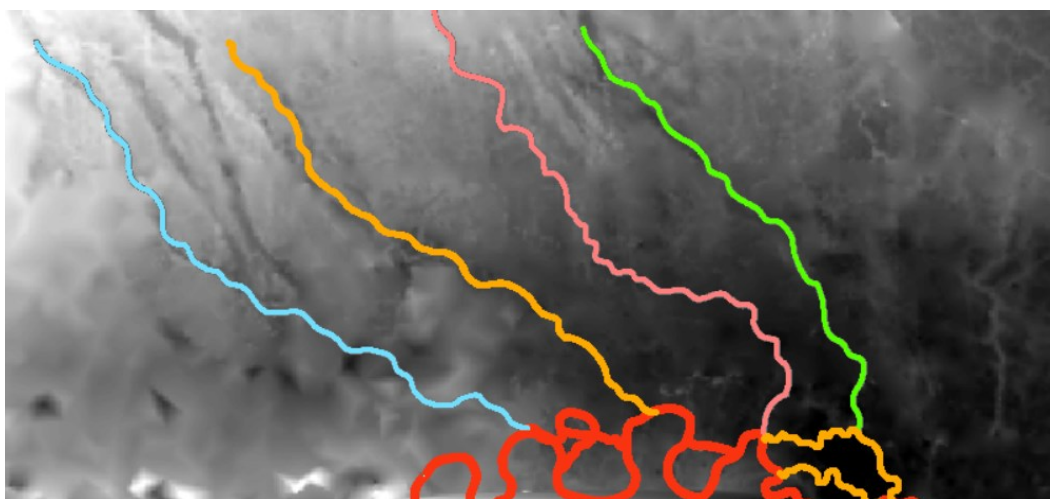


Fig. 26. Vettorializzazione su DTM epurato delle tracce paleoidrografiche riferite al Bronzo Recente: Po di Adria 1 (rosso); Menago (rosa); Tregnone (arancio; Tione (azzurro). Elaborazione effettuata con Esri ArcMap v. 10.2.

Quota di falda. Si tratta anche in questo caso di un valore regolabile. Il parametro considerato deriva sia da un confronto con dati contemporanei che dal record archeologico. Nel primo caso, sono state osservate le mappe relative alla profondità della falda disponibili sul geoportale della Regione Veneto (<https://idt2.regione.veneto.it/>), che indicano per quasi tutta l'area di indagine profondità comprese tra 1 e 1,5 m, si è ritenuto pertanto accettabile considerare per tutto l'universo di simulazione un valore unico di quota. Per quanto riguarda la profondità, tuttavia, per i test effettuati e per la calibrazione si è considerata una quota leggermente superiore. Un dato prezioso derivante dalle evidenze stratigrafiche, infatti, è la traccia delle canalette agrarie a Castello del Tartaro che, misurando la distanza dal coevo

piano di campagna, si presume intercettassero la falda ad una profondità di circa 50 cm (cfr *supra*, cfr Balista 2016). In merito all’escursione del livello, un esame dei dati piezometrici e di precipitazioni rilevati dalla stazione meteorologica di Sorgà evidenzia, per periodo di tempo di 6 anni, un’oscillazione massima di circa 50 cm. In mancanza di possibile confronto quantitativo con la situazione in età antica, si è considerata questa come indicazione per calibrare il modello secondo un range di oscillazione realistico.

Rete connettiva. Per l’attribuzione dei valori associati ai *connective-link*, ovvero alla classe di link funzionale al calcolo, da parte degli agenti, dei percorsi più convenienti in termini di costo energetico, è stata presa in considerazione una recente pubblicazione di Vaz et al. (2005) in cui si propone una panoramica dei dati in letteratura riguardo il dispendio energetico durante diversi tipi di attività svolte dall’uomo. I dati editi sono stati presentati tenendo conto di un presunto tasso metabolico basale (Basal Metabolic Rate, BMR, cfr. McNab 1997), ovvero l’energia dissipata a riposo, e della physical activity ratio (PAR, o “livello di attività fisica”), calcolata come rapporto tra costo energetico e BMR. Ai fini della simulazione sono stati rilevati i valori di PAR (misurati o stimati) relativi alla navigazione (per la mobilità all’interno dei corpi fluviali) e alla percorrenza a piedi in diversi tipi di ambiente (terreno erboso piano, bosco, terreno fangoso). Si è tenuto conto, anche se in ambito di pianura non consiste in un parametro sensibile quanto in contesti montuosi (per cui è nota e ampiamente diffusa una serie di algoritmi predittivi⁴⁸), anche di un valore di pendenza ricavato dalle quote del *Digital Terrain Model*. Per quest’ultimo fattore i valori di sforzo fisico sono stati ricavati, proporzionandoli alle diverse pendenze, dalle tabelle editate da Minetti et al. (2002).

	variabile	PAR (<i>weight</i>)
Walking open foot paths	forest	5.1
Walking level forest paths	forest	5.78
Walking in mud	mud	6.89
Sailing	water	1.42
Loading-and-unloading	/	4.35

Tab.3. Valori di spesa energetica di percorrenza in diversi tipi di terreno

⁴⁸ Di cui l’esempio più celebre è, probabilmente, è la *Tobler’s Hiking Function* (Tobler 1993)

<i>range di pendenza</i>	coefficiente di pendenza in salita	coefficiente di pendenza in discesa
0.05 - 0.15	1,85	0,5
0.15 - 0.25	3,95	0,8
0.25 - 0.35	5,9	1,3
0.35 - 0.45	8	1,95
> 0.45	100	100

Tab.4. Coefficienti per il calcolo della spesa energetica di percorrenza a piedi a diversi livelli di pendenza.

Produzione e fabbisogno alimentare

Produzione agricola. La produttività agricola in età antica è un fattore non facilmente commensurabile. I criteri di valutazione più comunemente adottati (quantità raccolta per unità di superficie o il rapporto tra quantità prodotta e quantità seminata) per le stime odierne prevedono una conoscenza abbastanza precisa della resa vegetale (Forni 2002, p.431) in base ad un'abbondante quantità di dati empirici, ovviamente non disponibili per l'età antica se non avvalendosi (pur, in ogni caso, con la dovuta cautela) di un numero di fonti scritte⁴⁹ tale da effettuare valutazioni più precise. Per l'età del Bronzo, per cui non si dispone di questo tipo di dati, una stima in tal senso è una questione ancor più complessa, anche accettando l'idea di proporre un dato in ogni caso relativo. Si tratta tuttavia di un parametro di cruciale importanza, non solo per il presente lavoro di ricerca, ma anche in funzione di uno studio delle tecniche colturali e del loro sviluppo e per formulare ipotesi più puntuali sull'uso del territorio, l'organizzazione sociale e il popolamento. Secondo Gaetano Forni (2002, p. 464) un livello tecnologico già avanzato con rotazione delle colture avrebbe garantito una produttività tra 8 e 10 q per ettaro. Diversi autori hanno scelto di avvalersi delle fonti classiche come De Martino (1979, 1984), che ha stimato la produzione tra un minimo di 6,38 q ad un massimo di 9,52 q per ettaro⁵⁰ e Ampolo (1980), quest'ultimo prendendo in considerazione fonti diacroniche per ricavare un valore medio approssimativo di 4-5 q per

⁴⁹ Anche se non sempre, ovviamente, le informazioni riportate dalle fonti sono risolutive. Come osservato da Debandi 2018, i documenti di età medievale in merito risultano scarsi e spesso non contengono dati abbastanza affidabili (Montanari 1984, p. 56) e non consentono pertanto un'analisi dettagliata con criteri statistici della reale produzione cerealicola.

⁵⁰ Il computo tiene in considerazione la produzione media per ettaro nell'Italia preindustriale (11 hl), e dunque una media di 24-28 modii per iugero.

ettaro. Pucci (1989), partendo dalle stime succitate, calcola una resa produttiva di 4-5:1 e propone una media di 3,5 q di farro, 1,1 q di orzo e 4,6 q di altri cereali per ettaro. La stima di Pucci tiene anche conto di due fattori non trascurabili, come il maggese e la quantità trattenuta per la semina successiva, che sono a loro volta parte del ciclo. Altri studi sempre rivolti alla produttività in età protostorica in Italia si sono invece basati principalmente su dati di tipo territoriale. Cremaschi (1991-1992), prendendo in considerazione un comparto dell'area emiliana, ha proposto una valutazione (*Land Evaluation*) considerando fabbisogno e disponibilità di grano, inserendo anche un coefficiente pedologico per differenziare la qualità del suolo. La superficie a coltivo riportata è stata ricavata dall'*indice di disboscamento* calcolato dai dati palinologici raccolti a S. Rosa di Poviglio, mentre il fabbisogno complessivo è stato stimato considerando un numero di 300 abitanti per ettaro nel Bronzo Medio e 250 abitanti per ettaro nel Bronzo Recente (cfr. *infra*). Seguendo un approccio differente e più pratico, tra il 2011 e il 2015 il Laboratorio di Archeologia sperimentale dell'Università di Bologna ha realizzato in località Solarolo un modulo destinato alla coltivazione cerealicola sperimentale, con l'obiettivo di affrontare le problematiche relative alla produzione nell'età del Bronzo, dalla modalità di semina e mietitura alla conservazione delle derrate (Carra et al. 2012, Cattani et al. 2021). Lo studio ha rivelato un potenziale produttivo molto alto, che trova comunque riscontro in altre ricerche sperimentali⁵¹. Per una varietà di *triticum spelta* le colture di Solarolo hanno restituito una produttività di oltre 36 q/ha). Cattani (2015), per una simulazione ricostruttiva dello spazio occupato in età protostorica nel territorio tra Panaro e Samoggia (nelle province di Modena e Bologna), ha proposto una stima indicativa del raccolto attorno ai 6 q, o calcolata al ribasso di 3 q, per ettaro (Cattani et al. 2021, Debandi 2021). Nella presente simulazione si è voluto considerare più tipologie di cereali coltivabili: oltre ai cereali vestiti (considerati come un'unica macro-categoria "*emmer/spelt*") sono infatti state inserite anche altre specie vegetali, e nello specifico *triticum aestivum* ("*wheat*"), *ordeum vulgare* ("*barley*"), *avena sativa* ("*oat*") e *panicum miliaceum* ("*millet*"), quest'ultima in particolare come "coltura stagionale di emergenza" in caso di perdita del raccolto annuale. Ciò comporta un'ulteriore incertezza riguardo l'effettiva produzione, scarseggiando studi sistematici su una produttività in età antica. Per la resa agricola di ogni specie vegetale, pertanto, è stata inserita una *slider*

⁵¹ Pur in un contesto del tutto differente, e dunque non propriamente confrontabile, sperimentazioni (della durata di quindici anni) condotte da Reynolds (1992, cfr. van Der Veen, Palmer 1997) presso la *Butser Ancient Farm* (Hampshire), ad esempio, hanno prodotto quantità intorno ai 17 q/ha.

nell'interfaccia per poter regolare discrezionalmente i valori medi di riferimento entro range stabiliti sia in base ai dati riportati dai vari studiosi che in base a dati derivati da colture biologiche contemporanee. Poiché l'analisi prevede di valutare una relazione della sopravvivenza rispetto alle variazioni climatiche, in base alle caratteristiche delle singole specie (cfr. paragrafo sulla gestione delle risorse in questo elaborato) è previsto un diverso grado di vulnerabilità che ne condiziona la resa produttiva (e che condiziona, indirettamente, la scelta della specie da coltivare da parte degli agenti). In base all'idoneità climatica (umidità e temperatura) sono state determinate differenti fasce produttive in risposta alle condizioni presenti. I valori di riferimento sono quelli riportati nella seguente tabella. I valori di produzione nel modello sono convertiti in apporto calorico, fissato a 350 kcal/100 g per tutti i cereali.

	gruppo	optimum termico stagionale (°C)				T min (°C)	T max (°C)	risposta all'umidità del suolo							
		primavera	estate	autunno	inverno			0	1	2	3	4	5	6	
<i>Triticum (vestiti)</i>	microterme	15	18	11	5	0	35	0	2	4	5	3	1	0	
<i>Triticum aestivum</i>	microterme	15	18	11	5	0,5	31	0	3	4	5	3	2	0	
<i>Ordeum vulgare</i>	microterme	15	18	11	5	0,5	35	0	3	4	5	2	1	0	
<i>Avena</i>	macroterme	15	18	7	5	1,5	35	0	2	4	5	4	2	2	
<i>Panicum miliaceum</i>	macroterme	25	25	25	25	1,5	45	0	3	5	4	1	0	0	

Tab.5. Sintesi dei parametri colturali impostati in AMPBV SIMULATOR in base alla sensibilità delle specie.

Fabbisogno alimentare. Al problema della produzione agricola si lega strettamente un altro fattore determinante, che richiede a sua volta una stima quanto più possibile realistica, ovvero il fabbisogno nutrizionale degli individui. Più autori hanno proposto, sulla base di diversi criteri di quantificazione, dei valori di riferimento sia per la produttività che per il fabbisogno alimentare, in particolare relativamente ai cereali data la loro preponderanza nel bilancio nutrizionale: per gran parte del mondo antico, l'apporto calorico della componente cerealicola doveva costituire circa il 70% del totale complessivo nella dieta quotidiana di un individuo e questo riferimento è verosimilmente applicabile anche alla maggior parte delle comunità

protostoriche sedentarie, come quelle attestate nell'età del Bronzo in Italia settentrionale (Debandi 2021 p.184). Facendo riferimento ancora una volta a Cattani et al. (2021), che tenendo in considerazione sia i dati FAO (2004) sia informazioni sulle razioni riportate dalle fonti classiche (Morineau 1997) stimano un fabbisogno giornaliero pari a 3000 kcal per i maschi adulti, 2200 per le femmine adulte, 2800 per i giovani lavoratori e 2000 per anziani e bambini, si deriva quindi un consumo di cereali rispettivamente di 2.100, 1.540, 1.960 e 1.400 kcal e dunque, secondo una stima grossolana, un fabbisogno medio di 1750 kcal pro capite. Questo valore è stato scelto come riferimento per il consumo cerealicolo della popolazione all'interno di AMPBV SIMULATOR.

Siti e popolazione

Nella rappresentazione dello scenario di partenza in AMPBV SIMULATOR è previsto un calcolo della popolazione iniziale in ogni sito in base alla sua estensione. Quest'ultimo valore è noto solo per parte degli insediamenti considerati (per cui si rimanda ad un confronto con le schede sito allegate), per i restanti è stato fissato un valore di riferimento di 2 ettari. Sono editi numerosi studi in letteratura, secondo diversi approcci, per il calcolo del rapporto tra popolazione presente e spazio occupato. Cremaschi (1992), ad esempio, ha proposto un calcolo della popolazione a partire dai dati spaziali e dalla stima della *catchment-area*, ricavando un numero complessivo di abitanti per ettaro di abitato pari a 250. Successivamente (Bernabò Brea et al.1997, p. 745) è stata proposta un'ulteriore analisi demografica per il territorio terramaricolo, ricavando dei valori medi di densità abitativa in sei contesti esaminati e stimando un valore medio complessivo di 14 abitanti per Km² nel Bronzo Medio 2 e 20 abitanti per ettaro nel Bronzo Recente. Per gli abitati di dimensioni più ridotte (< 3 ha) è stata stabilita una densità di circa 150 individui per ettaro, per i villaggi di medie dimensioni (4-9 ha) 100 individui, e per abitati molto estesi (10-15 ha) 85 e per i centri maggiori (15-20 ha) 75 individui per ettaro. Cardarelli (2006, 2009, 2010, 2014) si è ulteriormente occupato di occupazione del suolo e popolazione studiando i dati provenienti dall'area necropolare di Casinalbo. In questa analisi è stato calcolato innanzitutto il rapporto tra il numero di tombe rinvenute e l'estensione dell'area scavata. E' stato quindi stimato un numero di sepolture totali ad essa proporzionale, risultante in 3500 unità: La cifra è stata quindi suddivisa per 14, ovvero il numero di generazioni (28 anni per generazione) stimato nella durata complessiva della vita dell'insediamento, risultando in un numero di 250 abitanti per generazione.

Tenendo conto che l'estensione della terramara in questione è di circa 2 ha, egli ha calcolato che il numero medio di abitanti in un insediamento terramaricolo potesse quindi essere 125. In tempi più recenti è stato proposto (Vicenzutto 2017) anche un “metodo planimetrico” che trae in parte spunto dal cosiddetto “metodo nordico”⁵², messo a punto per i contesti ungheresi nella valle del fiume Benta. Tale sistema consiste in una valutazione del numero di individui per unità domestica⁵³, il quale viene moltiplicato per il numero di abitazioni stimate per ettaro (sulla base di indagini estensive in dei siti-campione); quest'ultimo valore è basato sulla quantità di materiali ceramici rinvenuti durante uno specifico campionamento. L'analisi ha condotto alla formalizzazione di quattro categorie di insediamenti⁵⁴, distinte secondo il desunto numero di individui per ettaro, associate ad altrettanti coefficienti (Vicenzutto 2017, p. 88-89). Per la fase di Bronzo Recente sono stati estrapolati un coefficiente per difetto di 129,6, uno medio di 209,4 e uno in eccesso di 279,3. Per via di un'inevitabile parzialità dei dati, tutti i metodi qui descritti presentano delle incertezze che rendono indeterminabile, al momento, la stima maggiormente accurata. Si è scelto anche in questo caso, quindi, di dare una possibilità di scelta sul parametro del popolamento iniziale.

Mortalità

Un parametro di riferimento importante per l'andamento della simulazione è l'età media alla morte, da cui deriva la quantità di popolazione presente nel sistema in condizioni “neutre”, ovvero in assenza dell'effetto di possibili fattori di stress (come la fame) demografico e a prescindere da possibili fattori ambientali condizionanti. In letteratura si dispone di un certo numero di informazioni derivate da studi osteologici dei resti nelle necropoli, tra cui si ritengono di particolare interesse, per via della numerosità e completezza dei dati, quelli nella necropoli di Casinalbo (cfr. Cavazzuti 2014). Di norma l'età alla morte è un valore che viene determinato per ogni categoria di età, ma nel caso della presente analisi viene considerato esclusivamente il dato relativo agli adulti⁵⁵; questo parametro è utilizzato all'interno del processo di aggiornamento demografico, e nello specifico *update-X-deceases*, per il calcolo della probabilità di morte degli individui in base all'età di appartenenza (per cui si rimanda al rispettivo paragrafo in questa tesi per una descrizione dettagliata). Poiché

⁵² Così definito dall'autore in quanto messo a punto da studiosi nordeuropei: Earle, Kolb 2010; Artursson 2010.

⁵³ La stima si basa sul lavoro di Narrol (1962), Kramer (1978), Kolb (1985) e Curet (1998) (cfr Chamberlain 2006).

⁵⁴ fattoria singola, “*hamlet*”, piccolo villaggio, grande villaggio

⁵⁵ Che rimane in ogni caso il valore ritenuto più affidabile, in quanto i resti scheletrici riferibili all'età adulta sono di norma il campione maggiormente rappresentato.

l'andamento demografico è un processo molto sensibile, nell'interfaccia del modello è presente una *slider* con cui è possibile modulare discrezionalmente questo parametro. Per consentire una più libera calibrazione all'utente è disponibile un range corrispondente all'intera fascia dell'età adulta (20-40 anni), benchè in base ai dati disponibili in letteratura, si ritenga una scelta realistica un valore compreso tra i 20/25 e i 30/35 anni.

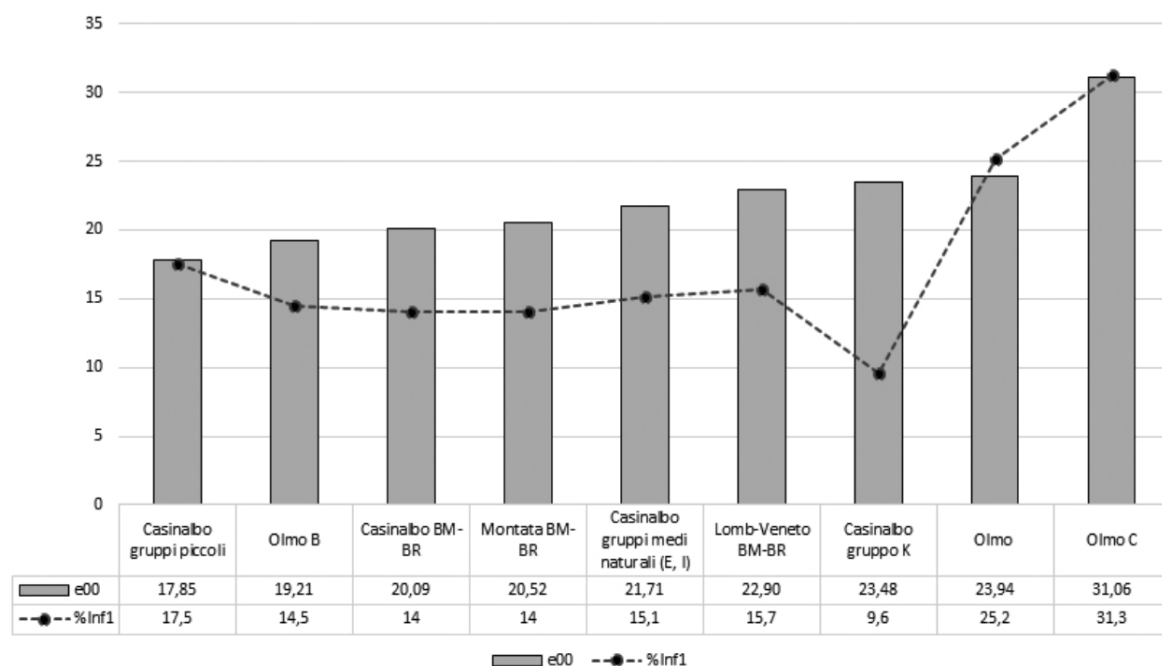


Fig.27. Diagramma comparativo dell'aspettativa di vita alla nascita in alcuni contesti di Bronzo Medio e Bronzo Recente (da: Cavazzuti, 2014, p.712).

4.5. Descrizione dei processi principali

4.5.1. Produzione

La produzione costituisce uno dei macro-processi fondamentali in AMPBV SIMULATOR, nonché il più esigente sia in termini computazionali che per dati input. Si tratta di un processo descrittivo della relazione biunivoca uomo-ambiente, in cui gli agenti-sito operano essenzialmente per soddisfare le esigenze interne di risorse (e dunque dalla composizione delle loro *households*), ma in risposta alle condizioni climatiche e pedologiche del territorio. La complessità di questo processo è uno dei fattori che hanno motivato la progettazione del modello ad una così alta risoluzione temporale. La scelta di una modellazione particolarmente descrittiva dipende in questo caso dalla crucialità del fattore produzione, e in particolare la produzione cerealicola, per le sorti degli agenti. Si quindi è

voluto considerare molteplici fattori determinanti, integrandoli nella simulazione in modo tale da poter osservare eventuali pattern emergenti sia a breve che a lungo termine. I modelli focalizzati sulla gestione delle risorse e sui cambiamenti territoriali sono una categoria di ABM molto diffusa, non solo in archeologia, proprio per la capacità di rappresentare ed eventualmente cogliere meccanismi complessi alla base di trasformazioni più o meno drammatiche del sistema. Spesso, un collasso.

Produzione: descrizione generale

Gli insediamenti, allo scopo di soddisfare le proprie esigenze collettive di consumo, cercano innanzitutto di avere una produzione a loro sufficiente delle risorse alimentari. In uno scenario reale, naturalmente, la varietà di categorie alimentari che contribuiscono alla sopravvivenza sono numerose se si tiene conto anche dell'apporto derivato dall'allevamento, oltre che di tutte le specie animali e vegetali "secondarie" sfruttate (coltivate e allevate, ma anche raccolte, cacciate e pescate). L'obiettivo posto non è tuttavia una riproduzione fedele, ma piuttosto osservare come mutamenti significativi possano scaturire da una carenza/abbondanza alimentare. Per tale finalità e in questa fase preliminare di stesura del codice, già di per sé estremamente articolato, si è scelto di limitarsi al campione agricolo e in particolare ai cereali. Benchè l'esito della produzione determini, indirettamente, la sopravvivenza delle *households* e dunque dei loro siti, l'agente prevalentemente operativo in questo processo sono gli agenti fissi o patch, o più precisamente l'*agentset* di patch appartenenti alle rispettive *catchment-area* (individuabili nell'attributo-sito *crops* e *pastures*). Le condizioni climatiche, imposte dall'utente tramite gli *switch drought* e *extra-rainfall*, oppure determinate in maniera stocastica ogni stagione, sono la variabile più condizionante.

Il comportamento degli agenti-patch dipende quindi da:

- La stagione in corso: lo sviluppo delle specie vegetali coltivate comporta dei ritmi stagionali che sono imposti agli agenti per intraprendere la coltivazione.
- le temperature e la piovosità stagionale, che influenzano il successo, ovvero la produttività delle colture in base alla tolleranza o alle esigenze (preimpostate al setup) di quattro diverse specie cerealicole.
- La disponibilità di manodopera (*workers*), in altre parole di individui (quantità estratta dagli attributi familiari locali) idonei a svolgere l'attività produttiva

- Indirettamente, a tessitura del suolo, che influenza la disponibilità idrica per la crescita vegetale
- La ricchezza del suolo, che dipende da quanto la singola unità territoriale è stata sfruttata a scopo agrario

Influenzati dalle suddette variabili attive nel sistema, gli agenti operano nel modo seguente:

- Annualmente (dunque ogni 4 cicli, al divenire dell'autunno) gli insediamenti - o *sites* - pianificano la loro produzione determinando gli spazi da dedicare alla cerealicoltura e all'allevamento
- Se non ancora assegnata, ciascuna delle *crops* determina la specie vegetale da produrre tra le microterme (sono dunque esclusi, in questa fase, miglio e avena).
- Ogni ciclo, la quantità di manodopera disponibile viene ripartita tra patch coltivate
- Ogni ciclo, dunque ogni stagione viene aggiornata l'umidità dei suoli
- Viene infine stimata la produttività di ogni patch coltivata in base ai fattori succitati
- Tutte le patch, al termine del processo, aggiornano la loro fertilità in base all'uso che ne è stato fatto.

Produzione: descrizione dettagliata

PLAN-PRODUCTION

- Gerarchia di comando: *go -> produce -> plan-production-> update-crops-and pastures*
- Agente operativo: *site*

Lo scopo di questo processo è essenzialmente quello di dare un ordine agli agenti-sito che aggiornano la propria *catchment-area* (si presume che l'insediamento più esteso abbia anche maggior potere all'interno della mappa, e dunque priorità nell'espandere il bacino di approvvigionamento). L'effettivo aggiornamento territoriale avviene con i singoli sottoprocessi attivati da *plan-production*, ossia *update-crops-and pastures* e *update-forest*.

```
to plan-production
  if ticks = 0 [ask patches [ifelse identity != "forest"
[set charge one-of [1 2 3]] [set charge 3]]]
  foreach sort-on [count my-patches] sites
    [the-site -> ask the-site [
      if season = "autumn" [
```

```

        update-crops-and-pastures
        update-forest ]]]
end

```

UPDATE-CROPS-AND-PASTURES

- Gerarchia di comando: *go -> produce -> plan-production-> **update-crops-and pastures->become-x***
- Gerarchia agenti operativi: *site > patch*

Il processo include una sequenza di più fasi. In prima istanza viene garantito un valore fondamentale, *last-mean-production* (media estrapolata da dai valori dell'attributo-patch *last-year-production*, il quale annota la produzione del precedente ciclo colturale e che in seguito a questo processo viene azzerato), il prodotto del precedente raccolto che serve a programmare la produzione agraria in ciascun sito. In base a questa quantità di riferimento e ad un valore *need-of-pastures* (calcolato moltiplicando il parametro discrezionale *pastures-per-population* per il quantitativo di popolazione) il sito stima una necessità di *crops* (celle coltivate) e *pastures* (celle destinate al pascolo). Le precedenti funzionalità (*identity*) vengono resettate divenendo prato, e riassegnate in base a due parametri: *distance* e *charge*, ovvero la distanza dal sito e il tempo trascorso in anni (valore inverso) dall'ultima messa a coltura⁵⁶(cfr. descrizione variabile di stato *charge*). L'attributo *soil-fertility* non è invece qui contemplato, in quanto il valore scandisce un decadimento della produttività del suolo sul lungo termine e che non è percepito dagli agenti nella propria dimensione temporale (a influenzare la scelta è invece la precedente menzionata *last-year-production*). Lo step successivo consiste nell'assegnazione del sito alle proprie patch di quella che sarà la loro funzionalità per tutto l'anno, secondo le regole:

- Quantifica la necessità di ettari coltivati in base al fabbisogno locale di produzione (tenendo conto di un "margine di sicurezza" del 10%), alla produzione media dell'ultimo raccolto (*last-mean-productivity*), all'eventuale rapporto privilegiato con il *border* "*metal-source*", che stimola un ulteriore incremento della produzione e ad eventuali scambi precedenti che hanno comportato la cessione di derrate.
- Quantifica la necessità di pascolo *need-of-pastures* in base alla popolazione e ai parametri prestabiliti

⁵⁶ Con coltura, nel contesto presentato, s'intende coltura cerealicola

- Ordina di assumere identità *pastures* alle patch con identità “*grass*” con minore valore di *charge*, in una quantità pari alla necessità o, con spazio insufficiente, alla massima quantità di spazio disponibile (considerando anche la necessità di spazio per le colture: *need-of-crops*)
- Ordina ad una quantità necessaria o disponibile di restanti patch con identità “*grass*” (privilegiando massima *charge*, che garantisce il completamento pregresso della rotazione) e la minor distanza dal sito.

```
to update-crops-and-pastures
```

```
  ifelse last-year-production = [] or last-year-production
= 0
  [set last-mean-production mean table:values crop-
productions_kg/ha * crop-energy
  set last-year-production []]
  [set last-mean-production mean last-year-production
  if last-mean-production = 0 [set last-mean-production
mean table:values crop-productions_kg/ha * crop-energy]
  set last-year-production []]
  set need-of-crops round ((population * (1750 * 365)) /
last-mean-production)
  let extra-need-of-crops ((table:get loss "food") / last-
mean-production)
  if [favourite] of metal-source = self [
    set need-of-crops need-of-crops * 1.1]
  let need-of-pastures population * pastures-per-population
  ask crops [become-grass]
  ask pastures [become-grass]
  update-my-patches
  ifelse count grass >= need-of-pastures + need-of-crops +
extra-need-of-crops
  [ask min-n-of need-of-pastures grass [charge] [become-
pastures]]
  [ifelse count grass >= need-of-pastures + need-of-crops
  [ask min-n-of need-of-pastures grass [charge]
[become-pastures]]
  [ask min-n-of (count grass - (need-of-crops * 0.9))
grass [charge] [become-pastures]]
  ]
  update-my-patches
  ifelse count grass >= need-of-crops
  [ask max-n-of need-of-crops my-patches with [identity =
"grass"] [charge / distance myself] [become-crops]]
  [ask grass [become-crops]]
```



```

update-my-patches
end

```

UPDATE-FOREST

- Gerarchia di comando: *go -> produce -> plan-production-> **update-forest**->become-forest*
- Gerarchia agenti operativi: *site > patch*

In seguito all'aggiornamento di aree coltivate e a pascolo viene anche, qualora ci sia la necessità, ampliato lo spazio boschivo di pertinenza, per mantenere un margine (che doveva da un lato fornire a sua volta risorse alimentari, e dall'altro un confine naturale a marcare il proprio territorio) progressivamente eroso dal consumo locale di legname. In questo processo, in mancanza di una quantità adeguata di foresta (*forest*: agentset di patch forestate) i siti ampliano il bacino di approvvigionamento, a condizione di potersi estendere in unità territoriali non ancora occupate.

```

to update-forest
  set need-of-forest population
  if count forest < need-of-forest
    [set my-farthest-patch max-one-of my-patches with [my-
site = myself] [distance myself]
    let possible-extra-forest patches in-radius (distance
my-farthest-patch) with [my-site = 0] with [identity =
"forest"]
    if any? possible-extra-forest [ifelse need-of-forest <
count possible-extra-forest
      [ask n-of (need-of-forest - count forest) possible-
extra-forest [set my-site myself]]
      [ask possible-extra-forest [set my-site myself]] ]
    update-my-patches ]
  end

```

CHOOSE-CROP-TYPE

- Gerarchia di comando: *go -> produce -> **choose-crop-type** -> choose-macrotherm/microtherm-crop-type*
- Agente operativo: *patch*

Eventuali patch destinate all'agricoltura (*crops*) non ancora occupate, cioè con valore di coltura o *crop-type* uguale a 0, avranno assegnata una specie da coltivare: se la stagione è autunno o inverno la specie selezionata sarà scelta tra specie microterme con ciclo annuale, mentre se primavera o estate saranno selezionate delle macroterme a ciclo stagionale.

```

to choose-crop-type
  ask patches with [identity = "crops"]with [crop-type =
0][
  set productivity []
  set season-productivity []
  estimate-soil-moisture
  if season = "autumn" [
    choose-microtherm-crop-type]
  if season = "spring" or season = "summer" [
    choose-macrotherm-crop-type]]
end

```

CHOOSE-MICROTHERM-CROP-TYPE, CHOOSE-MACROTHERM-CROP-TYPE

- Gerarchia di comando: *go -> produce -> choose-crop-type -> **choose-macrotherm/microtherm-crop-type***
- Agente operativo: *patch*

In questi due sottoprocessi viene scelta, per ciascuna patch, la specie coltivata in base all'adattabilità (valore generale: *crop-suitability*) all'umidità del suolo prevista (*estimated-soil-moisture*). Si riporta a scopo esemplificativo l'assegnazione delle colture in autunno o inverno.

```

to choose-microtherm-crop-type

  set crop-suitability table:make

  table:put crop-suitability table:get soil-moistures word
"barley" estimated-soil-moisture / abs table:get optimum-T
word season "barley" - MeanT "barley"
  table:put crop-suitability table:get soil-moistures word
"emmer/spelt" estimated-soil-moisture / abs table:get
optimum-T word season "emmer/spelt" - MeanT "emmer/spelt"
  table:put crop-suitability table:get soil-moistures word
"wheat" estimated-soil-moisture / abs table:get optimum-T
word season "wheat" - MeanT "wheat"

  set crop-type table:get crop-suitability max table:keys
crop-suitability
  set crop-suitability 0
end

```

ASSIGN-WORKERS

- Gerarchia di comando: *go -> produce -> assign-workers*
- Gerarchia agenti operativi: *site > patch*

Un valore determinante la produttività di ogni unità coltivata è la quantità di manodopera presente, ovvero i lavoratori (*workers*) impegnati nella cura e mantenimento dei campi. La presenza di lavoratori in ogni *patch* dipende dalla quantità e dalla composizione della popolazione in ciascun sito. Come porzione di abitanti idonea a questa attività sono conteggiati adulti, maturi e giovani; questi ultimi sono considerati al 50% in quanto la categoria include soggetti di età verosimilmente troppo giovane; per ricavare il valore finale di potenziali *workers* la somma risultante viene infine dimezzata, tenendo in considerazione un'ampia percentuale ipotetica di individui indisposti o altrimenti impegnati in differenti attività per il sito. La quantità è suddivisa per il numero di *crops* presenti e assegnata a queste ultime (attributo *workers-here*) in un numero massimo (la cui somma corrisponde a una quantità ideale o *best-maintenance*) regolabile dall'utente tramite una *slider* nell'interfaccia non avendo dati sufficientemente indicativi in merito, ma che per le analisi effettuate è stato stabilito a 4. Eventuali carenze o eccedenze di lavoratori vengono riportati rispettivamente all'interno dell'attributo tabellare *necessity* oppure *availability*, in previsione di un'eventuale cessione temporanea di manodopera con altre risorse nel processo di scambio.

```

to assign-workers

  ask sites [
    let my-workers adultus + maturus + (juvenes / 2) / 2
    let crop-workers my-workers + table:get reserve
  "workers"
    table:put reserve "workers" 0
    let best-crop-maintenance count crops * crop-maintenance
    ifelse crop-workers >= best-crop-maintenance
      [ask crops [
        set workers-here 4
        set season-productivity lput 5 season-productivity]]
      [ask crops [
        set workers-here round [crop-workers / count crops]
      of my-site
        let maintenance-productivity round ([crop-workers]
      of my-site * 5 / best-crop-maintenance)
        set season-productivity lput maintenance-productivity
      season-productivity]]
    ifelse my-workers >= best-crop-maintenance
      [table:put availability "workers" my-workers - best-
      crop-maintenance
        table:put reserve "workers" table:get availability
      "workers"
        table:put necessity "workers" 0]

```

```

    [table:put necessity "workers" best-crop-maintenance -
crop-workers
    table:put availability "workers" 0]
  ]
end

```

COMPUTE-SOIL-MOISTURE

- Gerarchia di comando: *go -> produce -> compute-soil-moisture -> **compute-productivity***
- Agente operativo: *patch*

Il processo di aggiornamento dell'umidità dei suoli svolge un ruolo fondamentale all'interno del modello, sia perché condiziona le previsioni e dunque le scelte degli agenti nei cicli successivi (cfr *estimate soil-moisture*), sia perché descrive il contributo di due dei fattori ritenuti più determinanti, il clima e lo stato del terreno, per il successo della produzione e per la sopravvivenza stessa degli insediamenti nel contesto terramaricolo nordpadano. Il contributo del clima deriva dalle variabili stagionali in corso ma anche, indirettamente, da quelle trascorse: è il caso dell'oscillazione (in positivo o in negativo) della falda freatica, la cui profondità minima (*watertable*) dipende sia dalla stagionalità che dalle precipitazioni nel periodo precedente e contribuisce in modo determinante all'idratazione dei suoli. Il processo *compute soil-moisture* è suddivisibile, concettualmente, in due sezioni principali. Nella prima parte viene calcolato l'attributo *soil-water*, la quantità d'acqua disponibile in ogni patch, o meglio la quantità d'acqua disponibile in un metro cubo all'interno di ogni patch. La scelta di questa specifica unità di riferimento è dovuta innanzitutto alla volontà di semplificare il calcolo, anche rispetto ai dati a disposizione: l'apporto di acque meteoriche ad esempio, espresso in mm stagionali, che indica i litri di pioggia precipitati in un metro quadro di superficie. Un'altra ragione sta nell'informazione stessa all'interno dei nostri dati, è il caso della tessitura del suolo: nelle mappe pedologiche utilizzate (per cui si rimanda al paragrafo dedicato ai dati input) l'indicazione riguarda il primo metro di profondità a partire dal piano di campagna. Dal tipo di tessitura presente in ogni *patch* (*soil-texture*) dipende una serie di valori essenziali per un calcolo del bilancio idrico, che per la presente analisi è stato semplificato secondo la seguente equazione:

$$P + A_f - ET$$

i cui termini sono:

- P precipitazioni (mm)
- A_f apporto di falda
- ET acqua persa per evaporazione e traspirazione delle specie vegetali presenti

Nell'equazione qui riportata non si tiene conto di una serie di fattori, quali la percolazione o il ruscellamento superficiale, che contribuiscono di norma a questo calcolo (cfr. Thornthwaite e Mather, 1955, 1957), in quanto di difficile stima con i dati a disposizione e comunque trascurabili ai fini della macro-classificazione a seguire. I fattori tenuti in considerazione si ritengono, rispetto allo specifico contesto fisiografico, quelli maggiormente determinanti e sono riferiti ad un bilancio giornaliero. La quantità di precipitazioni stagionale *precipitations* viene quindi suddivisa per un numero indicativo di 90 giorni, ottenendo un valore giornaliero nella variabile locale *daily-precipitations*. L'apporto di falda è costituito invece dalla somma delle variabili locali *saturation-zone-water* e *fringe-water*, ovvero l'acqua presente nella falda e nella frangia capillare all'interno del primo metro di profondità. Questi valori a loro volta dipendono, come già accennato, dall'attributo delle *patch watertable*, ovvero la profondità del tetto della falda, e dalla tessitura del suolo (*soil-texture*). La quota di falda deriva dalle precipitazioni della stagione precedente. La tessitura del suolo è invece un valore stabile e, per così dire, intrinseco in ogni unità spaziale, che deriva dalle mappe pedologiche regionali e da cui si ricava lo spessore della frangia capillare. Questo valore corrisponde alle quantità indicative per ogni classe tessiturale proposte da Fetter (2018). Per ogni patch è quindi innanzitutto calcolato lo spessore, entro il primo metro di profondità, sia della falda ovvero della zona satura (*saturated-thickness*) che della frangia di capillarità (*capillary-fringe-thickness*). L'apporto idrico associato a questi due elementi dipende ovviamente, oltre che dal loro spessore, dal quantitativo d'acqua contenuta, il quale è proporzionale alla granulometria e quindi, ancora una volta, alla tessitura e ai relativi parametri idrogeologici. La concentrazione idrica nella zona satura è quindi il punto di saturazione (*my-saturation-point*), relativo alla *saturated-thickness*, mentre per l'apporto dalla frangia capillare è stato considerato un valore approssimativo corrispondente al 50 % al punto di saturazione e al 50% alla capacità di campo (*my-field-capacity*), ovvero la concentrazione d'acqua, proporzionata al volume di terra di riferimento (1 m^3), in uno stato di equilibrio in cui i meati minori sono colmi d'acqua e i meati maggiori contengono aria; il valore risultante è stato definito *fringe-water*. La somma del contenuto d'acqua nella zona di saturazione e nella frangia capillare costituisce, insieme alle precipitazioni giornaliere, l'apporto idrico complessivo per il presente

computo di bilancio idrogeologico. Come fattore “sottrattivo” nel succitato bilancio è stato preso in considerazione il cosiddetto punto di appassimento (*my-wilting-point*), ovvero il parametro idrogeologico che esprime la quantità d’acqua trattenuta dal terreno con una forza superiore alla capacità di assorbimento radicale (in altre parole, la quantità inaccessibile alla vegetazione presente). Il valore dell’attributo *soil-water*, in sintesi, è calcolato come:

$$\textit{soil-water} = \textit{daily-precipitations} + \textit{saturation-zone-water} + \textit{fringe-water}$$

La seguente sezione codificata all’interno del processo serve a trasformare i valori “assoluti” di idratazione delle patch, senz’altro indicativi ma oggettivamente imprecisi, a più generici valori relativi, corrispondenti a 7 classi di umidità del terreno comprese tra 0 e 6. I due attributi di riferimento utili in tale calcolo, oltre alla *soil-water*, sono il già menzionato punto di saturazione, che indica una totale assenza di aria nel terreno a scapito dell’acqua, e dunque una condizione inadatta alla coltivazione (inducendo l’asfissia radicale e quindi la potenziale morte della pianta), e l’evapotraspirazione potenziale (variabile locale *evapotranspiration*), quantità che esprime il consumo idrico (quindi il fabbisogno) della vegetazione presente. Esistono numerose formule, più o meno specifiche⁵⁷, per la determinazione di questo valore. Nel nostro caso, data la genericità e il grado di incertezza sulle precise condizioni meteorologiche, su quelle pedologiche e sulla crescita stessa delle specie cerealicole prese in considerazione, si è scelto di utilizzare la formula di Hargreaves (Hargreaves, Samani 1982, 1985), di semplice applicazione in quanto necessità di un limitato numero di dati:

$$ET0 \text{ (mm d-1)} = 0,0023 R0 (T+17,8) \Delta T 0,5$$

I termini dell’equazione sono:

- ET0 (*evapotranspiration*): l’evapotraspirazione potenziale di riferimento (mm/d, ovvero millimetri al giorno, ovvero litri per m² al giorno);
- R0: l’evaporazione equivalente alla radiazione astronomica, o radiazione extraterrestre, dipendente dalla latitudine e dal periodo dell’anno. E’ il valore

⁵⁷ Cfr, ad esempio, con il metodo Turc (1961), il metodo Blaney e Criddle (1950), il metodo Thornthwaite (1948) o il più utilizzato metodo Penman-Monteith (Penman 1948; Monteith 1965, FAO 1998).

indicativo, in sostanza, del contributo dell'irradiazione solare al bilancio ed è anch'essa espressa in mm/d

- ΔT : l'escursione termica giornaliera ($\text{MaxT} - \text{MinT}$) in gradi centigradi ($^{\circ}\text{C}$);
- T : la temperatura media dell'aria ($^{\circ}\text{C}$) nel periodo di riferimento (quindi, nel nostro caso, la stagione in corso).
- Il valore 0.0023 è il coefficiente colturale generico che può essere ricalibrato sulla base di dati empirici (a noi non disponibili, dunque per il computo è stato mantenuto questo valore come costante). Un'altra costante di calibrazione è il valore 17,8.

Entrambe le costanti sono state proposte da Hargraves e Samani (1985).

Il valore ET_0 - *evapotranspiration* risultante e il valore di saturazione fungono quindi da parametro di riferimento per la classificazione dell'umidità del suolo, che viene così determinata nella modalità descritta nel codice qui riportato.

```
to compute-soil-moistures
```

```
set evapotranspiration R0 * 0.0023 * (MeanT + 17.8) *
(MaxT - MinT)
let daily-precipitations precipitations / 90
let saturated-thickness 1 - watertable
let fringe-level watertable - table:get fringes soil-
texture
let capillary-fringe-thickness 1 - fringe-level
let fringe-water (capillary-fringe-thickness / 2 * my-
saturation-point) + (capillary-fringe-thickness / 2 * my-
field-capacity)
let saturation-zone-water saturated-thickness * my-
saturation-point
  ifelse precipitations >= my-field-capacity
    [set soil-water my-field-capacity - my-wilting-point]
    [set soil-water precipitations - my-wilting-point]
  ifelse watertable < 1
    [set soil-water soil-water + saturation-zone-water +
fringe-water]
    [if fringe-level < 1 [
      set soil-water soil-water + fringe-water] ]
  ifelse soil-water <= evapotranspiration
    [ifelse soil-water = evapotranspiration
      [set soil-moisture 3]
      [ifelse soil-water >= ((evapotranspiration / 3) * 2)
        [set soil-moisture 3]
        [ifelse soil-water >= (evapotranspiration / 3)
          [set soil-moisture 2]
```

```

        [ifelse soil-water > 0
          [set soil-moisture 1]
          [set soil-moisture 0]]]]
    [ifelse soil-water <= evapotranspiration + (my-
saturation-point - evapotranspiration / 3)
      [set soil-moisture 3]
      [ifelse soil-water <= evapotranspiration + ((my-
saturation-point - evapotranspiration / 3) * 2)
        [set soil-moisture 4]
        [ifelse soil-water < my-saturation-point
          [set soil-moisture 5]
          [set soil-moisture 6]]]]
  end

```

Le classi di umidità 2 e 3, i più prossimi al quantitativo necessario alle colture e i più distanti dai valori “critici” indicanti insufficienza (*my-wilting-point*) o eccesso di umidità (*my-saturation-point*), sono pertanto da ritenersi quelli ottimali. La risposta in termini di produzione agricola, tuttavia, dipenderà anche dalla specie coltivata, più o meno affine ad un determinato livello di umidità.

COMPUTE-PRODUCTIVITY

- Gerarchia di comando: *go -> produce -> compute-productivity -> update-fertility-and-chage*
- Agenti operativi: *patch, site*

Con l’attivazione di questo processo vengono, per così dire, tratte le somme del ciclo colturale. Il tempo necessario al pieno sviluppo della specie presente è indicato dalla lunghezza della lista *productivity* in cui, ad ogni stagione di attività agricola presente nella patch, viene inserito un valore, *season-productivity*. Quest’ultimo viene calcolato come una media dei sotto-valori associati a ciascun “indicatore di produttività”, ovvero i valori in output dei precedenti step nel macro-processo *produce*: ricchezza del suolo, umidità del suolo, temperatura e manodopera presente. Ognuna di queste variabili viene convertita in un valore di produttività a seconda della specie coltivata e delle sue caratteristiche. Il processo *compute-productivity* si articola quindi in più fasi. Nella prima fase, è considerata l’umidità del suolo.

```

To compute-productivity
if not member? 0 season-productivity [
  set season-productivity lput (table:get soil-
moistures word crop-type soil-moisture) season-
productivity
  if last season-productivity = 0 [

```



```

        set season-productivity lput 0 but-last season-
productivity

```

In questo primo segmento l'indicatore considerato è l'umidità del suolo (*soil-moisture*). Un'umidità inferiore ad 1 (acqua insufficiente: appassimento) o superiore a 6 (ristagno idrico: asfissia radicale) comportano un potenziale azzeramento della produttività, determinato dall'estrazione randomizzata di un valore compreso tra 0 e 1. Se il valore approssimato risulta 0, la patch cessa di produrre, per avanzare nel processo è quindi condizione necessaria che la produttività stagionale includa sempre valori superiori.

```

if not member? 0 season-productivity [
  ifelse soil-fertility <= 0
    [set season-productivity lput one-of [1 0] season-
productivity]
    [set season-productivity lput round (6 * soil-
fertility / max-soil-fertility) season-productivity
      if crop-type = "emmer/spelt" or crop-type =
"barley" or crop-type = "millet" [
        if round (mean season-productivity) < 6 [set
season-productivity lput (last season-productivity + 1)
but-last season-productivity]
      ] ] ]

```

Analogamente, viene calcolato un valore di produttività direttamente proporzionale alla ricchezza del suolo, ma che dipende anche dal tipo di coltura presente: specie come il miglio oppure l'orzo, infatti, sono meno esigenti e quindi la loro produttività risulta meno compromessa con suoli più poveri.

```

if not member? 0 season-productivity [
  ifelse MeanT < table:get critical-min-T crop-type or MeanT
> table:get critical-max-T crop-type
    [set season-productivity lput 0 season-productivity]
    [let my-optimum-T table:get optimum-T word season
crop-type
      ifelse MeanT >= my-optimum-T
        [set season-productivity lput (MeanT - my-optimum-
T / (table:get critical-max-T crop-type - my-optimum-T /
5)) season-productivity]
        [set season-productivity lput abs ((my-optimum-T -
meanT) / (table:get critical-min-T crop-type - my-optimum-
T / 5)) season-productivity] ] ]

```

Influenzano l'esito dell'attività agraria, naturalmente, anche le temperature. Il valore considerato per questo segmento del processo è la temperatura media stagionale (*MeanT*), a cui vengono confrontati i valori-soglia (*critical-min-t*; *critical-max-t*) della specie coltivata.

```
ask patches with [identity = "crops"] with [crop-type !=
0][
  ifelse workers-here >= crop-maintenance
    [set season-productivity lput 6 season-productivity] ;
    [set season-productivity lput int ((workers-here * 6)
/ crop-maintenance) season-productivity]
```

Si tiene infine conto anche dei lavoratori presenti, ipotizzando una crescita vegetale migliore con le cure di una manodopera più presente.

```
if not member? 0 season-productivity [
  set season-productivity lput (table:get soil-
moistures word crop-type soil-moisture) season-
productivity
  if last season-productivity = 0 [
    set season-productivity lput 0 but-last season-
productivity
  ]
]
ifelse member? 0 season-productivity
[ask my-site [set last-year-production lput 0 last-year-
production]
set season-productivity []
set productivity []
set crop-type 0
;become-grass ; AMPBV 18
]
[set productivity lput int (mean season-productivity)
productivity
set season-productivity []
]
]
update-fertility-and-charge

ask sites [
  if any? crops with [crop-type = 0] with [workers-here >
0] [
    ifelse table:get demand "workers" = 0
      [table:put offer "workers" table:get offer "workers" +
sum [workers-here] of crops with [crop-type = 0]
      ask crops with [crop-type = 0] [set workers-here 0] ]
```

```

        [table:put demand "workers" table:get demand "workers"
- sum [workers-here] of crops with [crop-type = 0]
        ask crops with [crop-type = 0] [set workers-here 0]
        if table:get demand "workers" < 0 [
            table:put offer "workers" abs table:get demand
"workers"
            table:put demand "workers" 0]]
    ] ]
end

```

In ultima istanza, se la crescita vegetativa ha avuto buon fine il valore di produttività stagionale viene raccolto all'interno della lista generale *productivity* (riferita all'intero ciclo colturale) e resettato per la stagione successiva. Se, diversamente, il ciclo produttivo è cessato la patch mantiene la propria identità, rimanendo quindi disponibile per eventuali colture stagionali di emergenza (il miglio, ad esempio), ma ne vengono resettati i parametri di produttività e i lavoratori presenti vengono riassegnati oppure resi disponibili come bene di scambio comunitario.

PRODUCE-AGRICULTURE

- Gerarchia di comando: *go -> produce -> **produce-agriculture** -> harvest*
- Gerarchia agenti operativi: *site > patch*

Questo processo attiva, quando una coltura ha attraversato tutte le proprie fasi fenologiche, ovvero quando è trascorso un numero di stagioni (attestato dal numero di voci – *items* – nella lista *productivity*) tale da portare a compimento il ciclo vegetativo, il sottoprocesso *harvest*, che conclude la sequenza di produzione agricola all'interno delle *patch*.

```

to produce-agriculture
  ask sites [
    ask crops with [crop-type = "oat" and length
productivity = 3] [harvest]
    ask crops with [crop-type = "wheat" or crop-type =
"barley" or crop-type = "emmer/spelt"] with [length
productivity = 4] [harvest]
    ask crops with [crop-type = "millet"] [harvest]

    table:put reserve "food" (table:get reserve "food"* 0.8)
+ (sum [production] of crops * 0.7)
    ask patches with [production > 0][set production 0]
    update-my-patches]
end

```

HARVEST

- Gerarchia di comando: *go -> produce -> produce-agriculture -> **harvest***
- Gerarchia agenti operativi: *site > patch*

Con il processo *harvest* la produttività delle patch coltivate viene, come già accennato, convertita in produzione, e più precisamente in energia (Kcal) consumabile. Ciò avviene innanzitutto operando una media complessiva di tutti i termini all'interno della lista *productivity*. Si può osservare come il range di valori stabiliti per questo parametro vada da 1 a 5: la ragione di tale scelta sta nella volontà di creare macro-classi di produzione corrispondenti, grossomodo, a deviazioni standard in una distribuzione normale. Sapendo che entro tre deviazioni standard (in positivo e in negativo rispetto ad un valore medio) è incluso circa il 99% di una popolazione⁵⁸, i valori di produttività sono da intendersi come intervallo di valori di produttività possibili: *productivity* = 1 darà quindi le produzioni più modeste, *productivity* = 3 darà produzioni a cavallo della media, *productivity* = 5 darà le produzioni più alte e così via; il valore di produzione sarà estratto stocasticamente entro il rispettivo intervallo, e rappresenta la resa energetica della produzione agricola. La quantità così ricavata verrà sommata alla riserva alimentare (tabella *reserve->food*) per il successivo consumo. La patch attiva nel processo al suo termine vedrà i propri valori resettati, inclusa l'identità (da “*crops*” a “*grass*”).

```
to harvest
  if mean productivity != 0 [
    let st-dev-prod table:get crop-productions_kg/ha crop-
type / 3
    let max-prod st-dev-prod * round (mean productivity)
    let min-prod st-dev-prod * round (mean productivity) - 1
    set production one-of (range min-prod max-prod) *
table:get crop-energy crop-type ]
    ask my-site [set last-year-production lput production
last-year-production]
    set crop-type 0
    set productivity []
    become-grass
  end
```

UPDATE-FERTILITY-AND-CHARGE

- Gerarchia di comando: *go -> produce -> compute-productivity -> **update-fertility-and-charge***

⁵⁸ Intesa come insieme di elementi o, come in questo caso, di valori

- Agente operativo: patch

Questo sottoprocesso è stato implementato per regolare i due attributi-patch legati alla produzione che si aggiornano con il tempo: la fertilità del suolo, che si ripercuote nella produttività locale, e il valore *charge* che dipende dal tempo trascorso dall'ultimo periodo di maggese. La modalità di tale aggiornamento dipende dall'identità singola cella, ovvero dal suo utilizzo. Il processo è integrato all'interno di *compute-productivity* ed è rivolto alle *patch* coltivate, ma anche a tutte le *patch* non coltivate in cui questi valori risultino inferiori al massimo. Per quanto riguarda il valore *soil fertility*, indicativo del depauperamento del suolo e conseguentemente della sua produttività agricola in calo, la regola è, per le *patch* aventi identità "*crops*", di ridurre la propria fertilità di 0,25 (o di 0,5, in caso i tempi di rotazione non siano rispettati, e dunque la ricchezza dei suoli venga spesa ancor più rapidamente a causa di un mancato periodo di riposo del terreno). Il valore massimo di fertilità del suolo è regolabile mediante l'interfaccia, e prevede un incremento stagionale di 0,25 da parte delle unità non coltivate. Quello terramaricolo è un contesto in cui si evince, da diverse attestazioni archeologiche, un utilizzo del suolo secondo competenze già avanzate, e che doveva prevedere quindi non solo pratiche di aratura, ma anche di concimazione⁵⁹ e di mantenimento dei suoli. La funzione del parametro *charge* è quella di indurre (gli agenti selezionano le celle con valori più alti, il che implica che in eventuale assenza di spazi adeguati saranno utilizzabili anche celle con valore *charge* pari a 0, anche se a scapito della fertilità) una rotazione che doveva appartenere alle competenze tecniche dei siti. Anche per *charge* l'incremento stagionale del valore nelle *patch* non coltivate è di 0,25, e in questo caso il valore corrisponde anche al decremento periodico per quelle coltivate.

```
to update-fertility-and-charge
```

```
  if any? patches with [soil-fertility < max-soil-  
fertility] with [identity != "crops"] [  
    ask patches with [soil-fertility < max-soil-fertility]  
with [identity != "crops"] [set soil-fertility soil-  
fertility + 0.25]]  
    ask patches with [identity = "crops"] [ifelse charge = 0  
[set soil-fertility soil-fertility - 0.25]  
[set soil-fertility soil-fertility - 0.5] ]
```

⁵⁹ Anche se proprio questa, pratica, in determinate condizioni chimiche del suolo, può rivelarsi addirittura controproducente.

```

if any? patches with [soil-fertility <= 0] [
  ask patches with [soil-fertility <= 0] [
    set soil-fertility 0
    set charge soil-fertility] ]

if any? patches with [charge < 3] with [identity !=
"crops"] [
  ask patches with [charge < 3] with [identity !=
"crops"] [
    set charge charge + 0.25]]
if any? patches with [identity = "crops"] with [crop-
type != 0] [
  ask patches with [identity = "crops"] with [crop-type
!= 0] [
    set charge charge - 0.25]]
end

```

4.5.2. Scambi

Scambi: descrizione generale

In un sistema avanzato - dal punto di vista tecnologico ma, soprattutto, sotto l'aspetto produttivo e politico-organizzativo – come quello della Bassa Veronese nel Bronzo Recente, un fattore di complessità che ebbe senz'altro un ruolo nello sviluppo e nella sopravvivenza delle comunità presenti è la circolazione di beni. Pur immaginando un territorio strutturato per garantire quantomeno un'autonomia della *polity* per alcuni prodotti di prima necessità, in particolare prodotti alimentari, il contesto geografico planiziario non poteva permettere un approvvigionamento altrettanto immediato di altre tipologie di beni divenuti ormai indispensabili. I flussi di transito delle risorse minerarie, uno dei principali motori dell'economia di scambio nel “*world system*” dell'età del Bronzo, ebbero verosimilmente un ruolo fondamentale nella configurazione politica nel mondo terramaricolo e, in fase critica, nelle trasformazioni del suo assetto e nello sviluppo selettivo dei suoi centri abitati. In carenza di risorse di base interne alla *polity* sufficienti per il sostentamento dei villaggi, il successo delle comunità locali dovette affidarsi al coinvolgimento nelle reti di scambio su scala extra-regionale e dunque sul controllo del flusso di beni fortemente circolanti, come appunto il metallo. AMPBV SIMULATOR è un modello ad alta risoluzione concepito per osservare le trasformazioni del popolamento nei centri appartenenti all'area delle Valli Grandi Veronesi. Data la rilevanza delle attività di scambio in questo territorio si è voluto considerare, e quindi modellare anche dei processi commerciali, tenendo in considerazione una rete interna

all'universo esplorato, ma anche dei "punti di contatto" con l'esterno che possono aver favorito o sfavorito il successo delle singole realtà locali. *Update-and-exchange* è il macro-processo che descrive, secondo relazioni essenzialmente di tipo agente-agente, l'interattività economica tra i siti attraverso lo scambio di alcune categorie di beni. Dovendo necessariamente operare una semplificazione, sono state selezionate tre categorie di "beni" ritenute particolarmente importanti per l'osservazione dell'area di studio, le cui modalità di comparsa e circolazione sono state differenziata, con la scrittura di sotto-processi specifici, in base alla loro funzionalità per il sistema. La prima categoria di beni considerata è quella che rappresenta, per così dire, il punto di forza dell'offerta locale: le risorse alimentari. Gli agenti all'interno dell'"universo Bassa Veronese" consumano, producono e scambiano cibo in base alla loro necessità. Tale necessità è data prevalentemente dal fabbisogno interno, ma occasionalmente anche da una domanda esterna che favorisce lo scambio con, e quindi l'accesso ad altre categorie di beni. L'abbondanza di derrate può dunque favorire l'ingresso, ad esempio, di beni di lusso, ambra, oggetti esotici e soprattutto, nel nostro caso, di metallo. La seconda categoria-chiave di risorse presa in considerazione nel processo di scambio è appunto quella mineraria. Se quantificare con valori assoluti la presenza di questo tipo di risorse, grezze o lavorate, è un obiettivo decisamente troppo ambizioso per la presente ricerca, è altresì vero che per ricostruire potenziali flussi di scambio una quantificazione di questo tipo non è indispensabile. L'interesse della simulazione non risiede nel conteggio dei beni, ma nell'osservazione dei loro flussi, e per tale finalità è sufficiente determinare una "differenza di potenziale" di cessione e acquisizione tra gli agenti appartenenti al sistema. Le quantità relative alla domanda e all'offerta di metallo non sono quindi da considerarsi come accumuli concreti di materiale, bensì una quantificazione relativa alle loro presunte esigenze sulla base di due dati fondamentali: le dimensioni, quindi la numerosità della popolazione presente in ciascun sito, e la loro prossimità ad aree di approvvigionamento o di redistribuzione. La terza categoria si distingue dalle altre in quanto non è propriamente definibile come "bene" consumabile, ma data la gerarchizzazione politica e la forte vocazione per agricoltura e allevamento si ritiene abbia frequentemente fatto parte della contropartita nei processi di scambio. Si tratta della manodopera, dunque di lavoratori coinvolti nella produzione (specialmente, si suppone, produzione agricola). Benché sia contemplato, nel modello, il verificarsi di fenomeni migratori da una comunità all'altra (per cui si rimanda alla descrizione in dettaglio del processo *update-sites* e dei suoi sottoprocessi), si è voluto rappresentare anche

una modalità di spostamento temporaneo degli individui a scopo produttivo, in cui il lavoro dell'uomo costituisce un "oggetto di scambio" con risorse necessarie al proprio centro di appartenenza. In questa logica, nello scambio di manodopera e derrate sono individuabili rapporti di forza interni che promuovono dipendenze o prevalenze tra i siti, mentre il metallo costituisce una sorta di "motore" per i flussi che favoriscono o penalizzano l'approvvigionamento, e dunque il successo, di determinate comunità rispetto alle altre. Ai fini dell'analisi delle modalità di impatto e risposta alla crisi, la simulazione delle dinamiche interne di scambio permette di osservare eventuali riassetti dovuti ad una diversa disponibilità di risorse per fattori non esclusivamente ambientali, e quindi di valutare l'importanza dei flussi di scambio per la sopravvivenza delle entità nel sistema. Oltre che dalla prossimità alle risorse esterne e dal potenziale produttivo di risorse interne, i flussi di scambio dovevano essere direzionati anche da rapporti di fidelizzazione sia tra centri della polity che con interlocutori esterni ad essa. A rappresentare tale aspetto nel modello simulativo è una rete di *link* direzionali (*relational-links*) che collegano gli agenti-sito sia tra di loro che ai "punti di contatto" (*borders*) ai margini della mappa in corrispondenza delle principali vie di comunicazione e di scambio. L'attributo dei link relazionali, *reputation* ("reputazione"), attesta la frequenza e il successo delle transazioni nel tempo e costituisce una sorta di "memoria" che condiziona la futura scelta di un interlocutore.

Scambi: descrizione dettagliata

UPDATE-AND-EXCHANGE

- Gerarchia di comando: *go* -> ***update-and-exchange*** -> *update-offer-and-demand*; *update-priorities*; *choose-partner*; *exchange*
- Gerarchia agenti operativi: *site* -> *relational-links*

Le prime righe del codice hanno lo scopo di mantenere aggiornata, per tutti i link relazionali, la lista *reputation* (eventualmente riaggiornata al termine dello scambio in modo da consentire, nelle fasi successive del processo, di operare una media tra i valori presenti e di rivolgersi al sito con cui si sono avute transazioni più vantaggiosi. S'impone alla lista un contenuto massimo di 12 elementi, in modo da limitare la memoria delle esperienze di scambio pregresse ad un arco temporale di 3 anni, *Update-and-exchange* è così denominato in quanto il processo vero e proprio si apre con un aggiornamento di domanda e offerta per ogni categoria di beni scambiabili (a condizione, naturalmente, che i siti esistenti siano in numero

maggiore di 1). In presenza di almeno due siti con una domanda e un'offerta attiva (valore > 0), che abbiano cioè qualcosa da offrire e ricevere (dunque una ragione per intraprendere uno scambio), i siti effettuano una classificazione in cui assegnano una priorità alle categorie di beni (o più precisamente, assegnano agli attributi *priority-1/2/3* il nome del bene) in base alla loro carenza individuale. Segue quindi la scelta del partner di scambio (*choose-partner*), che avviene secondo un ordine non casuale, ma dettato dal rango (che coincide, per il contesto esaminato, con le dimensioni) dei siti. Se la scelta ha esito positivo, le due parti divengono l'una il *partner* commerciale dell'altra e viene attivato il processo di interscambio (*exchange*).

```

to update-and-exchange
ask relational-links [
  ifelse length reputation = 12
    [set reputation lput 0 but-first reputation]
    [set reputation lput 0 reputation]
]
if count sites > 1 [
  update-offer-and-demand
  if count sites with [reduce + table:values demand > 0]
with [reduce + table:values offer > 0] > 1 [
  ask sites [update-priorities]
  let sorted-sites sort-on [count site-area] sites
  foreach sorted-sites [the-site -> ask the-site [
    choose-partner
    if partner != 0 and partner != nobody [
      ask partner [set partner myself]
      exchange ]]]]
end

```

UPDATE-OFFER-AND-DEMAND

- Gerarchia di comando: *go -> update-and-exchange -> **update-offer-and-demand** -> update-food/metal/workers-offer-and-demand*
- Agente operativo: *observer*

Il processo consiste puramente nell'accorpamento di specifici sottoprocessi di determinazione della domanda e offerta locale di ogni bene.

```

to update-offer-and-demand
  update-food-offer-and-demand
  update-workers-offer-and-demand
  update-metal-offer-and-demand
end

```

UPDATE-FOOD-OFFER-AND-DEMAND

- Gerarchia di comando: *go* -> *update-and-exchange* -> *update-offer-and-demand* -> *update-food-offer-and-demand*
- Agente operativo: *observer* > *site*

Nel processo di aggiornamento della domanda e offerta di beni edibili, viene innanzitutto richiesto agli agenti (*sites*) di aggiornare altri due attributi tabellari, *availability* e *necessity*, in cui vengono riportati rispettivamente l'eccesso o la carenza, nel caso della voce in tabella "food", di cibo. Le quantità inserite dipendono dal surplus o deficit alimentare (che corrisponde in ogni caso alla variabile locale *food-surplus*, la quale può assumere valore negativo). Se sono presenti almeno due siti aventi disponibilità maggiore di 0 viene in seguito calcolata, per l'intero sistema, la deviazione standard della disponibilità alimentare di tutti i siti. Il valore risultante serve a determinare, per ogni sito, un valore relativo di offerta corrispondente al rapporto tra la disponibilità locale e la suddetta deviazione standard. La stessa procedura viene seguita anche per *necessity*.

```
To update-food-offer-and-demand

Ask sites [
  ifelse season = "summer"
    [set seasonal-reserve table:get reserve "food" / 4] ;
  AMPBV 18
  [ifelse season = "spring"
    [set seasonal-reserve table:get reserve "food"]
    [ifelse season = "winter"
      [set seasonal-reserve table:get reserve "food" /
2]
      [set seasonal-reserve table:get reserve "food" /
3]]]

let food-surplus seasonal-reserve - (population * 1750 *
90)
table:put old-reserve "food" table:get reserve "food"

ifelse food-surplus >= 0
[table:put availability "food" food-surplus]
[table:put necessity "food" abs food-surplus]
]
if count sites with [table:get availability "food" > 0] >=
2
```

```

[let food-availability-stdev standard-deviation
[table:get availability "food"] of sites with [table:get
availability "food" > 0]
  ask sites [
    ifelse food-availability-stdev > 0
    [table:put offer "food" round (table:get
availability "food" / food-availability-stdev)]
    [table:put offer "food" 1]
  ]
if count sites with [table:get necessity "food" > 0] >= 2
[let food-necessity-stdev standard-deviation [table:get
necessity "food"] of sites with [table:get necessity
"food" > 0]
  ask sites [
    ifelse food-necessity-stdev > 0
    [table:put demand "food" round (table:get necessity
"food" / food-necessity-stdev)]
    [table:put demand "food" 1]]]
end

```

UPDATE-WORKERS-OFFER-AND-DEMAND

- Gerarchia di comando: *go -> update-and-exchange -> update-offer-and-demand -> update-workers-offer-and-demand*
- Gerarchia agenti operativi: *observer > site*

Il processo consiste, sostanzialmente, nella medesima modalità di aggiornamento di domanda e offerta sulla base della disponibilità e della necessità complessive per l'intero areale. La disponibilità dei singoli siti è in questo caso già stata aggiornata nel processo di assegnazione dei lavoratori agricoli (*assign-workers*). L'utilità di questa procedura sta nell'ottenere una correlazione tra beni di natura diversa, le cui quantità sarebbero altrimenti difficilmente comparabili.

```

to update-workers-offer-and-demand

  ask sites [table:put old-reserve "workers" table:get
reserve "workers"]
  if count sites with [table:get availability "workers" >
0] >= 2
    [let workers-availability-stdev standard-deviation
[table:get availability "workers"] of sites with
[table:get availability "workers" > 0]
      ask sites [
        ifelse workers-availability-stdev > 0
        [table:put offer "workers" round (table:get
availability "workers" / workers-availability-stdev)]
        [table:put offer "workers" 1]
      ]
    ]

```

```

]]
if count sites with [table:get necessity "workers" > 0] >=
2
  [let workers-necessity-stdev standard-deviation
[table:get necessity "workers"] of sites with [table:get
necessity "workers" > 0]
    ask sites [
      ifelse workers-necessity-stdev > 0
        [table:put demand "workers" round (table:get
necessity "workers" / workers-necessity-stdev)]
        [table:put demand "workers" 1]
    ]
  ]
end

```

UPDATE-METAL-OFFER-AND-DEMAND

- Gerarchia di comando: *go -> update-and-exchange -> update-offer-and-demand -> update-metal-offer-and-demand*
- Agente operativo: *site*

Il processo *update-metal-offer-and-demand* è leggermente più complesso rispetto ai precedenti, poiché il calcolo di domanda e offerta (analogo a quello per le altre due categorie) è in questo caso anticipato dal calcolo di una serie di variabili, necessarie in quanto, come precedentemente menzionato, la domanda e l'offerta di metallo non dipendono da quantità assolute, ma dal potenziale di approvvigionamento e di redistribuzione di ogni sito. Si tiene innanzitutto conto dell'attributo *m-import-potential*, dato dall'inverso della distanza ponderata tra sito e *metal-source*, ovvero il *border* in corrispondenza della più vicina via di approvvigionamento ai metalli. Viene quindi definito l'*agentset* di *potential-importers*, ovvero l'insieme di siti aventi maggior distanza (l'attributo che indica tale distanza è *my-metal-distance*, e viene determinato al *setup*) dalla *metal-source*, e i rispettivi link relazionali (*import-links*). Il potenziale di esportazione di metallo in un sito (*m-export-potential*), è dato dalla somma dei valori di reputazione (*reputation*) dei suoi *import-links*.

```

to update-metal-offer-and-demand
ask sites [
  set m-import-potential 1 / [nw:weighted-distance-to [b-
node] of metal-source "weight"] of my-node
  let potential-importers sites with [my-metal-distance >
distance myself] with [my-metal-distance > [my-metal-
distance] of myself]
  let import-links my-in-relational-links with [endl =
one-of potential-importers]

```

```

    set m-export-potential sum [reputation] of link-set
import-links ]
    let max-import-potential max [m-import-potential] of
sites + 1
    let max-import-power max [table:get offer "food" +
table:get offer "workers"] of sites + 1
    let max-population max [population] of sites
    let max-export-potential max [m-export-potential] of
sites + 1

```

La successiva sezione del codice prevede il calcolo di valori percentuali (rispetto al valore massimo nel sistema) relativi ai potenziali di importazione ed esportazione del metallo, ma anche al cosiddetto *m-import-power* (che deriva dall'offerta di cibo e lavoratori di ogni sito, ovvero dalla quantità di beni scambiabili con metallo) e alla domanda locale o *local-metal-demand*, riferita al fabbisogno locale e dunque alla quantità di popolazione. La riserva (*reserve*) di metallo viene calcolata moltiplicando i valori percentuali *m-imp-potential* e *m-imp-power*. Sottraendo al risultato la *local-metal-demand* si ottiene un valore che va a definire l'*availability* del sito; se il calcolo della disponibilità dà un risultato negativo, ad *availability* sarà riassegnato un valore pari a 0. La necessità, al contrario, viene calcolata sommando la domanda locale al valore percentuale *m-exp-potential* (ricavato dal potenziale di esportazione).

```

ask sites [
    let m-imp-potential m-import-potential * 100 / max-
import-potential ;
    let m-imp-power (table:get offer "food" + table:get
offer "workers") * 100 / max-import-power
    let m-exp-potential m-export-potential * 100 / max-
export-potential
    let local-metal-demand population * 100 / max-
population
    table:put reserve "metal" m-imp-potential * m-imp-
power
    table:put old-reserve "metal" table:get reserve
"metal"
    table:put availability "metal" (m-imp-potential * m-
imp-power) - local-metal-demand
    if table:get availability "metal" <= 0 [table:put
availability "metal" 0]
    table:put necessity "metal" m-exp-potential + local-
metal-demand
]
let metal-availability-stdev standard-deviation [table:get
availability "metal"] of sites

```

```
let metal-necessity-stdev standard-deviation [table:get
necessity "metal"] of sites
```

A concludere il processo, i valori di domanda e offerta di metallo vengono determinati similmente alle altre tipologie di beni, dunque nella modalità precedentemente descritta.

```
let metal-availability-stdev standard-deviation [table:get
availability "metal"] of sites
```

```
let metal-necessity-stdev standard-deviation [table:get
necessity "metal"] of sites
```

```
ask sites [
  table:put offer "metal" round (table:get availability
"metal" / (metal-availability-stdev + 1))
  table:put demand "metal" round (table:get necessity
"metal" / (metal-necessity-stdev + 1))
  if table:get demand "metal" = 0 [table:put demand
"metal" 1]]
end
```

UPDATE-PRIORITIES

- Gerarchia di comando: *go* -> *update-and-exchange* -> *update-priorities*
- Gerarchia agenti operativi: *site*

In questo processo i siti determinano le loro priorità, ovvero attribuiscono un ordine alle categorie di beni scambiabili in base al valore della loro domanda. Per tale operazione una lista (*demands*) viene estratta dalla tabella *demand* e i suoi elementi vengono ridisposti in ordine ascendente; le priorità (*priority-1*, *priority-2*, *priority-3*) vengono assegnate secondo la lista *demands*.

```
to update-priorities

let demands table:to-list demand
let sorted-demands sort-by [ [list1 list2] -> item 1 list1
> item 1 list2 ] demands
set demand table:from-list sorted-demands

set priority-1 first table:keys demand
set priority-2 item 1 table:keys demand
let offer-2 table:get demand priority-2 - table:get offer
priority-2
set priority-3 item 2 table:keys demand
end
```

CHOOSE-PARTNER

- Gerarchia di comando: *go* -> *update-and-exchange* -> ***choose-partner***
- Gerarchia agenti operativi: *site*

Un sito in condizioni di dare e ricevere beni (avente cioè almeno un valore nella tabella *availability* maggiore di 0 e almeno un valore nella tabella *necessity* maggiore di 0) valuta, tra i siti ugualmente idonei allo scambio (se presenti), quello più adatto in funzione alle proprie priorità (*priority-1/2/3*) e alle proprie quantità eccedenti a disposizione. La scelta ricade idealmente su un sito il più possibile complementare in termini di domanda e offerta, poiché sia le quantità disponibili che quelle necessitate da entrambe le parti condizioneranno le quantità scambiate (cfr. *exchange*). Verrà quindi selezionato come *partner* il sito con maggior offerta dei beni più prioritari, con una miglior reputazione (un più alto valore *reputation* del relativo link relazionale) e una minor distanza ponderata (tenendo conto, cioè, della “spesa di spostamento all’interno della rete connettiva”).

```
to choose-partner
```

```
  let exchanging-sites sites with [reduce + table:values
demand > 0] with [reduce + table:values offer > 0]
```

```
  let rel-links sort-on [thickness] my-out-relational-links
  foreach rel-links [ x -> ask x [
    ask end2 [set exchange-distance [nw:weighted-distance-
to [my-node] of [end1] of x"weight"] of [my-node] of
[end2] of x]
  ]]
```

```
  If table:get offer priority-2 > table:get demand
priority-2 [
    if any? other exchanging-sites with [table:get offer
[priority-1] of myself > 0] with [table:get demand
[priority-3] of myself > 0 or table:get demand [priority-
2] of myself > 0] [
      set partner max-one-of other exchanging-sites
[(table:get offer [priority-1] of myself - [table:get
demand priority-1] of myself) +
                                                                    ([table:get
offer [priority-2] of myself] of self - [table:get demand
priority-2] of myself) +
                                                                    ([table:get
offer [priority-3] of myself] of self - [table:get demand
priority-3] of myself) *
                                                                    (1 + [mean
reputation] of in-relational-link-from myself / exchange-
distance)]
```

```

    ]]
    If table:get demand priority-2 > table:get offer
priority-2 [
        if any? other exchanging-sites with [table:get offer
[priority-1] of myself > 0 or table:get offer [priority-2]
of myself > 0] with [table:get demand [priority-3] of
myself > 0] [
            set partner max-one-of other exchanging-sites
[(table:get offer [priority-1] of myself - [table:get
demand priority-1] of myself) +
                                (table:get
offer [priority-2] of myself - [table:get demand priority-
2] of myself) +
                                ([table:get
offer [priority-3] of myself] of self - [table:get demand
priority-3] of myself) /
                                (1 + [mean
reputation] of in-relational-link-from myself / exchange-
distance)]
        ]
    ask sites [set exchange-distance 0]

end

```

EXCHANGE

- Gerarchia di comando: *go -> update-and-exchange -> **exchange** -> exchange-x; update-animals; update-reputation; update-offer-and-demand*
- Agente operativo: *site*

Una volta stabiliti i propri termini e l'agente interlocutore, i siti operano secondo il processo *exchange*, il cui codice è organizzato in tre sezioni. Innanzitutto, tutti i valori corrispondenti alle quantità del sito (*reserve*), prima di essere modificati, vengono salvati all'interno dell'attributo tabellare *old-reserve*: le quantità pre e post-scambio saranno in seguito utilizzate all'interno del processo *update-reputation*. Per le medesime ragioni, anche al partner viene richiesto di agire secondo la stessa modalità.

```

to exchange

table:put reserve "food" table:get reserve "food" + meat-
for-exchange
table:put old-reserve "food" table:get reserve "food"
table:put old-reserve "metal" table:get reserve "metal"
table:put old-reserve "workers" table:get reserve
"workers"

```



```

ask partner [
table:put reserve "food" table:get reserve "food" + meat-
for-exchange
set old-reserve table:make
table:put old-reserve "food" table:get reserve "food"
table:put old-reserve "metal" table:get reserve "metal"
table:put old-reserve "workers" table:get reserve
"workers" ]

```

Nel segmento successivo vengono stabiliti i rapporti proporzionali tra le necessità e le disponibilità di entrambi i siti coinvolti nello scambio. Se un valore di riferimento generale, in relazione alla disponibilità complessiva all'interno dell'universo, veniva stimato per il calcolo della domanda/offerta e dunque per indirizzare il sito al partner più conveniente sul piano economico, in questo passaggio si conferisce a ciascuna categoria di beni un valore relativo "interno" (*adjustment*) alla transazione da cui dipenderanno le quantità cedute.

```

if table:get availability "food" + [table:get availability
"food"] of partner > 0 [
    table:put adjustment "food" (table:get necessity
"food" + table:get reserve "food") + ([table:get necessity
"food" + table:get reserve "food"] of partner) /
    (table:get availability "food" + [table:get
availability "food"] of partner)
    ask partner [table:put adjustment "food" [table:get
adjustment "food"] of myself]]
if table:get availability "metal" + [table:get
availability "metal"] of partner > 0 [
    table:put adjustment "metal" (table:get necessity
"metal" + table:get reserve "metal") + ([table:get
necessity "metal" + table:get reserve "metal"] of partner)
/
    (table:get availability "metal" + [table:get
availability "metal"] of partner)
    ask partner [table:put adjustment "metal" [table:get
adjustment "metal"] of myself]]
if table:get availability "workers" + [table:get
availability "workers"] of partner > 0 [
table:put adjustment "workers" (table:get necessity
"workers" + table:get reserve "workers") + ([table:get
necessity "workers" + table:get reserve "workers"] of
partner) /
    (table:get availability "workers" + [table:get
availability "workers"] of partner)
    ask partner [table:put adjustment "workers" [table:get
adjustment "workers"] of myself]]

```

Nella porzione che segue il codice è interamente scritto come una struttura condizionale (*if-then-else method*) attraverso la quale, in base al rapporto tra la disponibilità dell'agente operativo e quella del *partner*, viene attivato uno tra 9 sottoprocessi opzionali che comporteranno l'effettivo trasferimento di beni da un'unità all'altra secondo la modalità definita dallo specifico sottoprocesso (*exchange-x*, per un maggior dettaglio si veda il paragrafo seguente).

```

    ifelse table:get availability [priority-1] of partner >
0 and [table:get availability [priority-1] of myself] of
partner > 0
    [exchange-1]
    [ifelse table:get availability [priority-1] of partner
> 0 and [table:get availability [priority-2] of myself] of
partner > 0
    [exchange-1-2]
    [ifelse table:get availability [priority-2] of
partner > 0 and [table:get availability [priority-2] of
myself] of partner > 0
    [exchange-2]
    [ifelse table:get availability [priority-2] of
partner > 0 and [table:get availability [priority-1] of
myself] of partner > 0
    [exchange-2-1]
    [ifelse table:get availability [priority-1] of
partner > 0 and [table:get availability [priority-3] of
myself] of partner > 0
    [exchange-1-3]
    [ifelse table:get availability [priority-2] of
partner > 0 and [table:get availability [priority-3] of
myself] of partner > 0
    [exchange-2-3]
    [ifelse table:get availability [priority-3]
of partner > 0 and [table:get availability [priority-3] of
myself] of partner > 0
    [exchange-3]
    [ifelse table:get availability [priority-
3] of partner > 0 and [table:get availability [priority-2]
of myself] of partner > 0
    [exchange-3-2]
    [if table:get availability [priority-3]
of partner > 0 and [table:get availability [priority-1] of
myself] of partner > 0
    [exchange-3-1]]]]]]]]]]

```

La parte conclusiva del processo *exchange* comporta un aggiornamento della reputazione (*update-reputation*) e dei valori di domanda e offerta (*update-offer-and-demand*), indirizzando l'agente ai rispettivi processi. I parametri *adjustment* e *partner*, invece, strettamente funzionali alla singola operazione di scambio, vengono resettati.

```
ask partner [
    update-reputation
    update-offer-and-demand
    table:clear adjustment
    set partner 0]
```

```
update-reputation
table:clear adjustment
update-offer-and-demand
set partner 0
end
```

EXCHANGE-X

- Gerarchia di comando: *go -> update-and-exchange -> exchange -> **exchange-x***
- Agente operativo: *site*

Exchange-1, *exchange-2*, *exchange-3*, *exchange-1-2*, *exchange-1-3*, *exchange-2-1*, *exchange-2-2*, *exchange-2-3*, *exchange-3-2*, *exchange-3-1* sono sottoprocessi che descrivono l'atto dello scambio di beni tra due agenti-sito. Per facilitare sia la scrittura che la comprensione del codice sono stati definiti processi differenziati in base a quale delle priorità dei due *partner* è coinvolta nello scambio. Se infatti in una situazione ideale ciascuno riceve il bene avente maggiore priorità (è il caso di *exchange-1*, di cui è riportato qui il codice come esempio, che comporta uno scambio "*priority-1 - priority-1*"), è verosimile che un sito abbia anche modo di procurarsi esclusivamente beni di minor interesse. In questi nove processi sono descritti gli scambi secondo ogni possibile combinazione di diverse priorità. In ogni processo *exchange-x* si stabilisce innanzitutto la quantità scambiata, che corrisponde alla quantità cedibile dal partner avente minor disponibilità; questa condizione è imposta per far sì che la controparte possa in ogni caso corrispondere un valore proporzionato a quanto ricevuto. La quantità trasferita da un sito all'altro tiene inoltre conto di un "aggiustamento" dipendente dalla disponibilità complessiva interna al rapporto di scambio (somma della disponibilità delle due parti coinvolte), ed espresso dall'attributo *adjustment*. Questa soluzione funge da compromesso, in assenza di un valore monetale di riferimento, per correlare tipologie, estremamente diverse fra loro, di beni circolanti. Le quantità scambiate vengono quindi

addizionate (se acquisite) o sottratte (se cedute) alle rispettive riserve locali (attributo: tabella *reserve*).

```
to exchange-1
```

```
  ifelse [table:get availability [priority-1] of myself]
of partner < table:get necessity priority-1
```

```
    [table:put reserve priority-1 table:get reserve
priority-1 + [table:get availability [priority-1] of
myself] of partner
```

```
    ask partner [table:put reserve [priority-1] of
myself table:get reserve [priority-1] of myself -
[table:get availability [priority-1] of myself] of
partner]
```

```
    let counterpart (table:get availability [priority-
1] of partner + [table:get availability priority-1] of
partner) * [table:get availability [priority-1] of myself]
of partner /
```

```
    (table:get availability priority-1 + [table:get
availability [priority-1] of myself] of partner)
```

```
    let adjusted-counterpart counterpart * (table:get
adjustment [priority-1] of partner / table:get adjustment
priority-1)
```

```
    table:put availability [priority-1] of partner
table:get availability [priority-1] of partner - adjusted-
counterpart
```

```
    ask partner [table:put reserve priority-1 table:get
reserve priority-1 + adjusted-counterpart
```

```
        table:put necessity priority-1
table:get necessity priority-1 - adjusted-counterpart]
```

```
    table:put necessity priority-1 table:get necessity
priority-1 - [table:get availability [priority-1] of
myself] of partner
```

```
    ask partner [table:put availability [priority-1] of
myself 0] ]
```

```
    [table:put reserve priority-1 table:get reserve
priority-1 + table:get necessity priority-1
```

```
    ask partner [table:put reserve [priority-1] of
myself table:get reserve [priority-1] of myself -
[table:get necessity priority-1] of myself]
```

```
    let counterpart-b (table:get availability
[priority-1] of partner + [table:get availability
priority-1] of partner) * table:get necessity priority-1 /
    (table:get availability priority-1 + [table:get
availability [priority-1] of myself] of partner)
```

```

        let      adjusted-counterpart-b      counterpart-b      *
        (table:get adjustment [priority-1] of partner / table:get
        adjustment priority-1)
        table:put      availability      [priority-1]      of      partner
        table:get      availability      [priority-1]      of      partner - adjusted-
        counterpart-b
        ask partner [table:put reserve priority-1 table:get
        reserve priority-1 + adjusted-counterpart-b
        table:put      necessity      priority-1
        table:get      necessity      priority-1 - adjusted-counterpart-b]
        table:put      necessity      priority-1 0
        ask partner [table:put availability [priority-1] of
        myself table:get      availability      [priority-1]      of      myself -
        [table:get      necessity      priority-1] of myself] ]

    end

```

UPDATE-REPUTATION

- Gerarchia di comando: *go* -> *update-and-exchange* -> ***update-reputation***
- Agente operativo: *site*

Uno scambio tra agenti può garantire a una o entrambe le parti ciò che richiedono secondo diversi gradi di priorità e in quantità differenziate. Il grado di soddisfazione conseguente il processo di scambio *exchange* influenza link relazionale che collega un agente all'altro, nello specifico il suo attributo *reputation*. Per quantificare tale soddisfazione si tiene conto del rapporto tra ricavo e perdita di beni, dunque il rapporto tra il valore dell'attributo *gain* e il valore dell'attributo *loss* (entrambi di appartenenza agli agenti-sito). *Gain*, o più precisamente il valore in tabella *gain* corrispondente alla categoria di beni ricevuta (nel codice espressa come *priority-x*), è dato dal rapporto tra la necessità (*necessity*) e la differenza tra le riserve correnti (*reserve*) e precedenti (*old-reserve*). Dopo *gain* e *loss* viene infine calcolato il guadagno complessivo nel valore (attributo sito) *exchange-balance*, il quale viene trasmesso al *relational-link* in direzione del *partner* di scambio e inserito come ultimo termine della lista *reputation* (attributo link).

$$(Last) \text{ reputation} = \text{exchange-balance} = \text{gain} - \text{loss}$$

$$\text{Gain} = \text{necessity} / (\text{reserve} - \text{old-reserve})$$

$$\text{Loss} = \text{availability} / (\text{old-reserve} - \text{reserve})$$

to update-reputation

```
    ifelse table:get old-reserve priority-1 < table:get
reserve priority-1
    [table:put gain priority-1 table:get necessity priority-
1 / (table:get reserve priority-1 - table:get old-reserve
priority-1)
    table:put loss priority-1 0]
    [table:put gain priority-1 0
    ifelse table:get old-reserve priority-1 > table:get
reserve priority-1
    [table:put loss priority-1 table:get availability
priority-1 / table:get old-reserve priority-1 - table:get
reserve priority-1]
    [table:put loss priority-1 0]]
```

```
    ifelse table:get old-reserve priority-2 < table:get
reserve priority-2
    [table:put gain priority-2 table:get necessity priority-
2 / (table:get reserve priority-2 - table:get old-reserve
priority-2)
    table:put loss priority-2 0]
    [table:put gain priority-2 0
    ifelse table:get old-reserve priority-2 > table:get
reserve priority-2
    [table:put loss priority-2 table:get availability
priority-2 / table:get old-reserve priority-2 - table:get
reserve priority-2]
    [table:put loss priority-2 0]]
```

```
    ifelse table:get old-reserve priority-3 < table:get
reserve priority-3
    [table:put gain priority-3 table:get necessity priority-
3 / (table:get reserve priority-3 - table:get old-reserve
priority-3)
    table:put loss priority-3 0]
    [table:put gain priority-3 0
    ifelse table:get old-reserve priority-3 > table:get
reserve priority-3
    [table:put loss priority-3 table:get availability
priority-3 / table:get old-reserve priority-3 - table:get
reserve priority-3]
    [table:put loss priority-3 0]]
```

```
ifelse table:get gain priority-1 > 0
    [ifelse table:get gain priority-2 = 0
        [set exchange-balance table:get gain priority-1 -
(table:get loss priority-2 + table:get loss priority-3)]
```

```

    [set exchange-balance (table:get gain priority-1 +
table:get loss priority-2) - table:get loss priority-3] ]

    [set exchange-balance table:get gain priority-2 -
(table:get loss priority-1 + table:get loss priority-3)]

ask in-relational-link-from partner [set reputation lput
[exchange-balance] of end2 but-last reputation]
set exchange-balance 0

end

```

4.5.3. Consumo

Una volta raccolto il frutto della produzione ed eventualmente il ricavato dagli scambi, all'interno delle riserve di ciascun sito (*reserve*), gli agenti provvedono al proprio sostentamento mediante il processo di consumo. Le categorie di beni consumati non corrispondono alle categorie coinvolte nel processo di scambio. E' il caso dei lavoratori, ma anche del legname, che pur avendo senz'altro avuto un ruolo anche nei flussi commerciali non è stato preso in considerazione per questa simulazione. L'interesse per questa categoria è infatti dato soprattutto dall'impatto dei consumi degli insediamenti sul paesaggio, nel Bronzo Recente già fortemente trasformato, oltre che dal regolare utilizzo, dalla messa in opera delle grandi strutture arginali. I beni sfruttati sono quindi quelli alimentari derivati dalla coltivazione (i prodotti derivati dall'allevamento non sono conteggiati), all'interno del processo *consume-food*, e il legname (inteso sia come materiale da costruzione che come combustibile) nel processo *consume-forest*. L'esito dei processi di consumo è determinante per il benessere all'interno dei siti, e di conseguenza per la loro sopravvivenza (cfr processo *update-sites*).

CONSUME-FOOD

- Gerarchia di comando: *go -> consume -> consume-food*
- Agente operativo: *site*

Il processo inizia calcolando il fabbisogno locale complessivo (*need-of-cereals*), calcolato in base alla quantità di popolazione presente nel sito. La quantità calcolata viene sottratta alla riserva locale di cibo (tabella: *reserve*, "*food*"), ammesso che il quantitativo disponibile sia sufficiente a coprire il fabbisogno della comunità. Da questo fattore dipende l'aggiornamento della lista *hunger* (attributo del sito), che riflette la soddisfazione o l'insoddisfazione delle

necessità alimentari del villaggio: nel primo caso il valore inserito è 0 (piena soddisfazione del fabbisogno), nel secondo caso viene inserito il valore corrisponde al quantitativo calorico mancante. *Hunger* è un attributo concepito come una lista poichè riflette il benessere o malessere in un arco di tempo più ampio rispetto alla singola stagione. Un protrarsi prolungato dello stato di denutrizione avrà ripercussioni su vita, morte ed eventuale migrazione degli occupanti il sito (cfr *update-population* e *update-sites*).

```
to consume-food
  let need-of-cereals population * 1750 * 90
  ifelse table:get reserve "food" >= need-of-cereals
    [table:put reserve "food" table:get reserve "food" -
    need-of-cereals
      set hunger lput 0 hunger
      set hunger remove-item 0 hunger]
  [let missing-cereals need-of-cereals - table:get reserve
  "food"
    table:put reserve "food" 0
    set hunger lput round (missing-cereals / need-of-
    cereals-per-person) hunger
    set hunger remove-item 0 hunger]
end
```

CONSUME-FOREST

- Gerarchia di comando: *go -> consume -> consume-forest*
- Agente operativo: *site*

Il processo *consume-forest* descrive l'erosione della copertura boschiva circostante i siti, al fine di soddisfare sia il bisogno locale di combustibile sia il bisogno di materia prima per la creazione di strumenti e la costruzione (o manutenzione) di strutture (abitative, difensive o produttive). Il fabbisogno di legna da ardere (si rimanda alla sezione dedicata ai dati input per ulteriori dettagli) è un valore che varia in base alla stagione attorno ad un valore arbitrario di riferimento (*firewood*): avremo, naturalmente, consumi inferiori in estate rispetto all'inverno, sia per le maggiori temperature che per la maggior quantità di luce. Le quantità indicate nel processo sono sempre direttamente conteggiate come ettari di bosco. Se la stima del combustibile è un dato necessariamente soggetto ad un ampio margine di incertezza, ancor più difficilmente prevedibile è la quantità di legname impiegata nella lavorazione. Per tale

ragione, un valore random (in un range compreso tra 0 e 0,5⁶⁰) viene aggiunto al fabbisogno precedente calcolato come contributo al consumo di legname, o meglio, come consumo di ettari forestati. Le patch selezionate per tale consumo assumono identità “grass”.

```
to consume-forest

  if season = "summer" [set need-of-forest firewood * 0.05
* count my-households]
  if season = "spring" [set need-of-forest firewood * 0.06
* count my-households]
  if season = "autumn" [set need-of-forest firewood * 0.08
* count my-households]
  if season = "winter" [set need-of-forest firewood *
count my-households]
  set need-of-forest int (need-of-forest + (random-poisson
5 / 10))
  ifelse need-of-forest <= count forest * 0.5

  [ask n-of need-of-forest forest [become-grass]
    set forest my-patches with [identity = "forest"]]
  [ask forest [become-grass]
    ;]
    set my-farthest-patch max-one-of patches with [my-site
= myself] [distance myself]
    let potential-new-forest patches in-radius ([distance
myself] of my-farthest-patch + 1)
    with [identity = "forest"]
    with [my-site = 0]
    if any? potential-new-forest [
      ifelse count potential-new-forest >= round need-of-
forest
        [ask n-of round need-of-forest potential-new-forest
[set my-site myself]]
        [ask potential-new-forest [set my-site myself]] ]
    ]
  update-my-patches
end
```

4.5.4. Aggiornamento demografico

Un aspetto-chiave nell’indagine dei processi di evoluzione e collasso è senz’altro quello demografico, per il modello qui presentato si è scelto pertanto di rappresentare in dettaglio la popolazione anche specificando e aggiornando sesso ed età dei componenti di ogni unità

⁶⁰ All’interno del codice il valore estratto è compreso in un range da 0 a 5, e successivamente diviso per 10, poiché il comando *random-poisson*, predisposto dal software e utilizzato per l’estrazione casuale del numero, restituisce esclusivamente valori interi.

familiare. Con questa impostazione si è voluto offrire all'utente che analizza l'ambito di studio la possibilità di effettuare osservazioni sulla composizione della popolazione, individuando eventuali pattern significativi, ad esempio nella percentuale di bambini, adulti, giovani e anziani, ovvero categorie diversamente impattanti sulle sorti del centro abitato di appartenenza. Solo una percentuale di popolazione presente nel sito, ad esempio, è in grado di contribuire al lavoro manuale per la produzione agricola e naturalmente solo la popolazione femminile appartenente ad una determinata fascia di età (qui corrispondente all'età adulta) è in grado di generare nuovi membri della comunità. Ogni categoria di età è inoltre associabile ad un diverso grado di probabilità di morte, sia in condizioni "normali" (cioè in assenza di crisi) sia in risposta ad altre particolari sollecitazioni del sistema (come ad esempio, pur non essendo parte dell'analisi sviluppata in questa sede, per effetto di conflitti o epidemie). Si è dunque ritenuto interessante dotare il modello di questa caratteristica, specialmente perché per definirla non è stato necessario creare una specifica sottocategoria di agenti che avrebbe senz'altro appesantito il programma, compromettendone drasticamente i tempi di caricamento e aggiornamento e dunque, in ultima istanza, la fruibilità stessa. L'entità maggiormente interessata dai processi di aggiornamento sono le *households*, che (come già precisato) costituiscono l'unità minima, in termini gerarchici, delle componenti agenziali nel modello. Esse sono dotate di due attributi dedicati, espressi in forma di tabelle. Nelle versioni più recenti di NetLogo sono preinstallate delle estensioni per consentire agli utenti di integrare comandi e reporter scritti in Java o altri linguaggi e che possono essere utilizzati nei modelli NetLogo, premettendo al codice il comando primitivo (*primitive*) "*extensions*". Tra le estensioni utilizzabili già integrate esiste appunto *tables*. La definizione di variabili costituite da valori multipli è possibile anche tramite l'uso di liste (*lists*), a scapito però dei tempi computazionali. Le tabelle hanno infatti caratteristiche leggermente diverse, come ad esempio la mutabilità⁶¹, che ottimizzano le prestazioni in fase di esecuzione. La definizione di ciascun valore è tipicamente associata alle cosiddette *keys*, mentre quello che segue (*value*) è il valore stesso. I due tipi di attributi tabellari (*key* – *value*) associati alle *households* sono:

- *family* (nome – numero), per il quale ad ogni valore corrisponde il numero di componenti del gruppo familiare appartenenti ad un determinato genere e ad una

⁶¹ Per mutabilità s'intende che i valori al loro interno possono essere direttamente modificati anziché creare, come nel caso delle liste, una copia modificata. Se la tabella viene utilizzata in più di una stringa del codice, tutte le modifiche apportate verranno visualizzate ovunque.

determinata classe di età definito dalla rispettiva *key* (ad esempio *male-juvenes*, *male-adultus*, *female-juvenes*, *female adultus*).

- *M-family-clock* e *F-family-clock* (numero - numero), che rappresentano rispettivamente l'avanzamento anagrafico di ciascun membro della famiglia. Questi due attributi sono definiti da due valori numerici: il primo funge da codice identificativo dell'individuo, viene assegnato in ordine progressivo al setup e successivamente estratto addizionando 1 al più alto valore già presente per garantirne l'unicità; il secondo valore numerico,

Si è optato per questa modalità di rappresentazione come miglior compromesso in termini computazionali, ossia per consentire una più rapida risposta al comando di ricerca di un determinato valore da un lato, e ridurre la probabilità di errore di scrittura (con stringhe di comando eccessivamente lunghe e articolate) dall'altro nel richiamare i valori all'interno dei processi interessati. La quantità e la composizione della popolazione sono informazioni evidentemente indispensabili anche per descrivere l'evoluzione, quantificare i bisogni e le risorse, e soprattutto determinarne direttamente la sopravvivenza delle entità sito (*sites*). Anche i siti sono quindi dotati di variabili demografiche, ma di carattere più generico:

- *Population* (numero), ovvero la quantità di popolazione complessiva del sito e dunque data dalla somma dei valori in *family* delle *households* di appartenenza (*households-here* o *my-households*)

Il valore viene inizialmente calcolato in base all'estensione (nota, presunta o ipotizzata) del sito secondo le proporzioni determinate dall'utente nel settaggio del parametro *initial-population*.

- *Tot-female-infans-a*, *tot-male-infans-a*, *tot-male-infans-b*, *tot-female-infans-b*, *tot-male-juvenes*, *tot-female-juvenes*, *tot-male-maturus*, *tot-female-maturus*, *tot-male-seniles*, *tot-female-seniles* (numero) definiscono il numero complessivo di membri della comunità appartenenti a ciascuna classe di età e sesso. Tali valori sono periodicamente aggiornati in più momenti del ciclo tramite il comando *update-local-population*.

I processi maggiori che utilizzano le variabili appena descritte, a scopo di aggiornamento demografico sia delle *households* che (conseguentemente) dei siti stessi sono: *setup-households*, che predispone lo scenario demografico preesistente al “momento zero”(cfr *supra*), e *update-population*, che raggruppa i processi *age*, *update-deceases*, *update-births*.

AGE

- Ordine di comando: *go -> update-population -> age*
- Gerarchia agenti operativi: *site > household*

Con questo processo viene descritta la modalità di invecchiamento degli individui all'interno delle *households*. E' previsto un incremento regolare di 0,25 (poiché la risoluzione temporale del modello è di una stagione, ad ogni ciclo viene sommato al valore pertinente un quarto di un anno) a partire dagli 0 sino ad un massimo di 80 anni (età comunque quasi impossibile da raggiungere con questa predisposizione del processo) per cui viene forzato il "decesso" (cfr ultime righe del codice qui riportato). Come riferimento sono stati presi in considerazione gli intervalli di Vallois (1937) proposti per rappresentare gli stadi morfologici e morfometrici dello sviluppo scheletrico dell'uomo, quindi:

- Infantile 1 (0-6 anni), *Infans-a*⁶²
- Infantile 2 (7-12 anni), *Infans-b*
- Giovanile (13-20 anni), *Juvenis*
- Adulto (21-40 anni), *Adultus*
- Maturo (41-60 anni), *Maturus*
- Senile (61 o più anni), *Senilis*

Il codice è costituito da due componenti essenziali. La prima descrive l'incremento di anni, o meglio di quarti di anno di ogni componente familiare, ed è modellata come procedura anonima associata a ciascun parametro delle tabelle *m/f-family-clock*. La seconda fase del processo descrive invece l'avanzamento da una classe di età all'altra sino all'età senile, e contempla l'appartenenza o meno a ciascuna di queste categorie. In questo modo è possibile intervenire sulla popolazione (sia deliberatamente, grazie alla concezione "open-box" dei modelli basati sull'agente, che attraverso procedure automatizzate) mantenendo uno stato eterogeneo e "naturale" di invecchiamento della popolazione.

```
to age
ask sites [
ask households-here [
```

```
foreach table:keys m-family-clock [x ->
```

⁶² Sono stati utilizzati i termini "infans-a" e "infans-b" anziché i canonici "infans-1" e "infans-2" per una ragione meramente tecnica, ossia limitare, in fase di programmazione, la possibilità di incorrere ad erronee associazioni con altri valori numerici.

```

    table:put m-family-clock x table:get m-family-clock x
+ 0.25]
    foreach table:keys f-family-clock [x ->
    table:put f-family-clock x table:get f-family-clock x
+ 0.25]

    if member? 6 table:values m-family-clock [
    table:put family "male-infans-a" table:get family
"male-infans-a" - 1
    table:put family "male-infans-b" table:get family
"male-infans-b" + 1]
    if member? 6 table:values f-family-clock [
    table:put family "female-infans-a" table:get family
"female-infans-a" - 1
    table:put family "female-infans-b" table:get family
"female-infans-b" + 1]
    if member? 12 table:values m-family-clock [
    table:put family "male-infans-b" table:get family
"male-infans-b" - 1
    table:put family "male-juvenes" table:get family
"male-juvenes" + 1]
    if member? 12 table:values f-family-clock [
    table:put family "female-infans-b" table:get family
"female-infans-b" - 1
    table:put family "female-juvenes" table:get family
"female-juvenes" + 1]
    if member? 20 table:values m-family-clock [
    table:put family "male-juvenes" table:get family
"male-juvenes" - 1
    table:put family "male-adultus" table:get family
"male-adultus" + 1]
    if member? 20 table:values f-family-clock [
    table:put family "female-juvenes" table:get family
"female-juvenes" - 1
    table:put family "female-adultus" table:get family
"female-adultus" + 1]
    if member? 40 table:values m-family-clock [
    table:put family "male-adultus" table:get family
"male-adultus" - 1
    table:put family "male-maturus" table:get family
"male-maturus" + 1]
    if member? 40 table:values f-family-clock [

```

```

        table:put family "female-adultus" table:get family
"female-adultus" - 1
        table:put family "female-maturus" table:get family
"female-maturus" + 1]
    if member? 60 table:values m-family-clock [
        table:put family "male-maturus" table:get family
"male-maturus" - 1
        table:put family "male-seniles" table:get family
"male-seniles" + 1]
    if member? 60 table:values f-family-clock [
        table:put family "female-maturus" table:get family
"female-maturus" - 1
        table:put family "female-seniles" table:get family
"female-seniles" + 1]
    if member? 80 table:values m-family-clock [
        table:put family "male-seniles" table:get family
"male-seniles" - 1
        table:remove m-family-clock item (position 80
table:values m-family-clock) table:keys m-family-clock]
    if member? 80 table:values f-family-clock [
        table:put family "female-seniles" table:get family
"female-seniles" - 1
        table:remove f-family-clock item (position 80
table:values f-family-clock) table:keys f-family-clock
    ]]]
end

```

UPDATE-DECEASES

- Ordine di comando: *go -> update-population -> update-deceases -> update-x-deceases -> kill-one-x*
- Agente operativo: *site*

```

to update-deceases
  ask sites [
    update-infans-a-deceases
    update-infans-b-deceases
    update-juvenes-deceases
    update-adultus-deceases
    update-maturus-deceases
    update-seniles-deceases

    compute-death-rate]
end

```

Questo processo raggruppa al suo interno una serie di sottoprocessi, legati alle diverse classi di età, che descrivono la morte degli individui all'interno delle households secondo specifiche distribuzioni di probabilità. La probabilità di decesso per ciascuna categoria è determinata secondo una funzione di distribuzione. Nel tempo sono state proposte funzioni di vario tipo allo scopo di rappresentare e analizzare la sopravvivenza (Cox, Oakes 1984; Fleming, Harrington 1991) di organismi o componenti meccaniche, prendendo in considerazione un'estesa base empirica di dati. Per quanto concerne l'uomo, sono stati proposti modelli fortemente caratterizzati e dettagliati⁶³ per descriverne un trend "universale" di mortalità, ma si è trattato spesso di modelli basati su gruppi umani di epoca contemporanea o comunque assai più recente rispetto al quadro cronologico in esame. Molto meno si sa, per esempio, sulle condizioni di mortalità tra piccole società di foraggiamento o orticole che hanno caratterizzato una gran parte della storia dell'uomo. Le ricerche sino ad oggi compiute, ad ogni modo, hanno messo in luce come i profili di mortalità di queste popolazioni, sebbene secondo andamenti tendenzialmente più estremi rispetto a quanto osservato per le popolazioni recenti (cfr. Weiss 1973, Gage 1988), tendano a conformarsi al modello generale, la cui rappresentazione più conosciuta (in termini di funzione di distribuzione della probabilità di morte) è quella di Gompertz-Makeham (Gompertz 1925; Makeham 1860). Il modello generale sembra essere caratterizzato da un eccesso di mortalità nell'età più giovane, con un rapido e monotono declino nel corso vitale sino ad un minimo nell'età preadulta, seguito da un aumento accelerato, approssimativamente esponenziale, della mortalità nelle età successive. Data l'assenza, nel nostro caso, di un nutrito corpo di dati empirici che consenta una precisa calibrazione della curva di riferimento, si è scelto di utilizzare una funzione più semplice rispetto a quella di Gompertz, ma ad essa strettamente legata e con la quale condivide il medesimo trend discendente (prima) e ascendente (poi): la cosiddetta *bathtub distribution* o distribuzione "a vasca da bagno", il cui nome deriva dal profilo caratteristico della curva, oggi spesso sfruttata per stimare l'affidabilità di apparecchiature e componenti meccaniche, e che in fase di testing⁶⁴ ha dato risultati soddisfacentemente verosimili. Una curva a vasca da bagno mette in relazione graficamente tre tipi di "guasto": precoce ("morte infantile", con probabilità esponenzialmente decrescente), casuale (probabilità costante) e

⁶³ Cfr., ad esempio, Coale e Demeny 1966; Keyfitz e Flieger 1990; Preston 1976.

⁶⁴ Il test si è basato sull'osservazione della frequenza di mortalità per ogni categoria di età (> 100 runs) per ogni categoria su gruppi di 50, 100 e 200 elementi), e ha condizionato anche la scelta del parametro β (vedi formula a seguire).

usura (probabilità crescente a livello esponenziale). Così come difetti di fabbricazione e dei materiali possono determinare un malfunzionamento precoce negli oggetti, difetti congeniti, una precoce malnutrizione, o ancora eventi traumatici casuali maggiormente impattanti in età precoce si manifestano tipicamente nei primi anni di vita in un essere umano. Poiché in epoca antica, in condizioni igienico-ambientali plausibilmente meno stabili rispetto ad oggi, per il periodo in esame si ipotizza una manifestazione particolarmente critica di questo effetto. La successiva regione della curva, detta “regione di vita utile”, il “fallimento”/decesso di un dispositivo o di un organismo avviene in modo casuale; i valori di stato (nel nostro caso l’età degli individui) compresi in questo intervallo hanno dunque pari probabilità di morte. I traumi e le sollecitazioni di un prodotto nel normale periodo d’uso, così come i microeventi che scandiscono l’esistenza umana, conducono ad un progressivo stato di usura che porta il soggetto, in ultima istanza, alla morte o cessazione del funzionamento. Quest’ultima fase di vita descritta dalla curva è detta, non a caso, “periodo di esaurimento” (Heiser, Hofmeister 2019), con una distribuzione di probabilità di morte sottesa ad una curva esponenziale ascendente. La curva a vasca da bagno è efficacemente rappresentabile tramite la funzione di Weibull (Weibull 1951):

$$F(T) = \beta/\mu (T/\mu) e^{-(T/\mu)^\beta}$$

Si tratta di una funzione flessibile, il cui andamento dipende dal parametro di forma o parametro β , che per la fase di mortalità infantile, per la fase di vita utile e per il periodo di esaurimento assume rispettivamente valori inferiori, pari o superiori a 1. I termini dell’equazione sono dunque:

- l’età media alla morte μ , il cui valore (*mean-death-age*) è regolabile dall’interfaccia tramite *slider*.
- T , ovvero il momento, nel nostro caso l’età, di riferimento, semplificata ad un valore medio per ogni intervallo di Vallois (*infans-a*: 3 anni; *infans-b*: 9 anni; *juvenis*: 16 anni; *adultus*: 30 anni; *maturus*: 50 anni; *senilis*: 70 anni)
- e : base del logaritmo naturale, o costante di Nepero (approssimata a 2,7183)
- β : il già menzionato parametro di forma della curva.

Il seguente è un esempio del processo codificato in NetLogo per una specifica fascia di età (*maturus*).

```
To update-maturus-deceases
```



```

ask households-here [
  table:put family "female-maturus" length filter [x ->
x >= 40 and x < 60] table:values f-family-clock
  table:put family "male-maturus" length filter [x -> x
>= 40 and x < 60] table:values m-family-clock ]

let maturus-households households-here with [(table:get
family "female-maturus" + table:get family "male-maturus")
> 0]
ask maturus-households [
  let maturus-here table:get family "female-maturus" +
table:get family "male-maturus"
  repeat maturus-here [
    let maturus-death-probability (precision ((5 / mean-
death-age) * (2.71828 ^ (1 - ((50 / mean-death-age) ^
5)))) 2) * 20
    let maturus-weighted-death-probability maturus-
death-probability - (maturus-death-probability * full-
nutrition-benefit)
    let maturus-death-chance random 40000
    if maturus-death-chance <= maturus-weighted-death-
probability [kill-one-maturus]
  ]
]
end

```

Il valore associato alla probabilità (*x-death-probability*) è diviso per 4, per ridimensionare la probabilità annuale a quella in una stagione. Il valore successivo (*x-death-chance*) è estratto casualmente, secondo l'algoritmo di randomizzazione implementato in NetLogo, in un range di valori tra 0 e 10000⁶⁵. Nel caso in cui questo valore ricada al di sotto della soglia di probabilità viene attivato il sottoprocesso *kill-one-x*, per il quale si rimanda al paragrafo dedicato ai processi secondari.

UPDATE-BIRTHS

- Ordine di comando: *go -> update-population -> **update-births** -> generate-a-child*
- Gerarchia agenti operativi: *site>household*

Il processo relativo alla natalità dipende direttamente da quello di aggiornamento dei decessi (*update-deceases*), da cui dipende il valore di input *death-rate*, cioè il tasso di mortalità. All'interno di questo processo si determina infatti l'incremento demografico in un sito, a partire dal rapporto tra il numero di morti in una stagione e la quantità di popolazione locale

⁶⁵ Il valore è alto per poter inserire nel computo valori di probabilità sempre interi.

presente nel medesimo intervallo temporale. In uno stato neutrale del modello⁶⁶, il rapporto tra mortalità e natalità risulta 1 (pari valore: stato di equilibrio), è tuttavia possibile modificare questo valore in maniera automatizzata (a determinate precondizioni, tramite gli *switch hunger-factor* e *nutrition-factor*) oppure attraverso una *slider (population-increase)*. I valori regolabili possono essere sia positivi (crescita demografica) che negativi (decrescita demografica), e appartengono ad un range da 0,1 a 2 con un incremento di 0,1. Ad ogni ciclo, quindi, viene calcolata innanzitutto come *birth-rate* la frequenza stagionale delle nascite in ciascun sito, dunque il rapporto tra numero di nascite (*newborns*) e il valore noto (periodicamente aggiornato) di popolazione locale. In base al numero di nascite ricavato secondo questa proporzione si ottiene la probabilità P di nascita per ogni individuo fertile della comunità:

$$P = \text{numero di nascite} / \text{popolazione fertile} * 1000$$

Se il valore estratto stocasticamente da ciascuna household (l'estrazione è iterata localmente tante volte quanti sono gli individui fertili che ne fanno parte) è al di sotto della soglia P (*birth-probability*), si innesca il sottoprocesso di “nascita” *generate-a-child*. A concludere il processo, i valori demografici del sito vengono aggiornati (comando: *update-population*).

```
to update-births
  ask sites [
    let birth-rate death-rate * (population-increase / hunger-
    effect-coefficient) / 100
    let newborns round birth-rate * population
    let fertiles-households households-here with [table:get
    family "female-adultus" > 0]
    if any? fertiles-households [
      ask fertiles-households [
        repeat table:get family "female-adultus" [
          let birth-probability newborns / sum [table:get
          family "female-adultus"] of fertiles-households * 1000
          let birth-chance random 1000
```

⁶⁶ In realtà, in base a questa impostazione del processo, sono risultate significative discrepanze rispetto al risultato atteso. Si rimanda, a tale proposito, al paragrafo sul testing di questo elaborato.

```

        if birth-chance <= birth-probability [generate-a-
child]]
    ]]
    update-local-population]
end

```

MANAGE-MARRIAGES

- Ordine di comando: *go -> update-population -> manage-marriages*
- Gerarchia agenti operativi: *site>household*

Dulcis in fundo, sono stati modellati i processi di “accoppiamento” tra individui, in maniera in realtà del tutto pragmatica e non per descrivere aspetti impalpabili (e in ogni caso di scarso interesse per la presente analisi) quali innamoramento e corteggiamento tra individui, e per ragioni di semplificazione, almeno in questa fase di sviluppo, non sono stati considerati aspetti di carattere culturale che dovevano certamente influenzare le modalità di accoppiamento (in base a quanto suggeriscono i dati, le società dell’età del bronzo dovevano essere tendenzialmente patrilocali). Il processo è stato definito a scopo essenzialmente funzionale per definire, secondo una dinamica molto basilare, la comparsa e lo sviluppo di nuove *household*. In presenza di almeno un giovane adulto (cioè preceduto per età da almeno un altro adulto appartenente allo stesso genere) e di una giovane adulta all’interno della comunità del sito, essi “abbandonano” la famiglia di appartenenza (o meglio, è la loro *household* che aggiorna i propri attributi sottraendo a se stessa un elemento) e viene generata una nuova famiglia in cui i primi componenti saranno i due adulti selezionati. Poiché la comparsa della nuova famiglia è modellata come una moltiplicazione di quella preesistente, i suoi attributi *family* e *x-family-clock* vengono prima resettati.

```

to manage-marriages

if any? my-households with [table:get family "female-
adultus" > 1] and any? my-households with [table:get
family "male-adultus" > 1] [

    let bride-household one-of households-here with
[table:get family "female-adultus" > 1]
    let groom-household one-of households-here with
[table:get family "male-adultus" > 1]

```

```

ask bride-household [
  table:put family "female-adultus" table:get family
"female-adultus" - 1
  let bride-age min filter [x -> x >= 20 and x < 40]
table:values f-family-clock
  table:remove f-family-clock item (position bride-age
table:values f-family-clock) table:keys f-family-clock

ask groom-household [
  table:put family "male-adultus" table:get family "male-
adultus" - 1
  let groom-age min filter [x -> x >= 20 and x < 40]
table:values m-family-clock
  table:remove m-family-clock item (position groom-age
table:values m-family-clock) table:keys m-family-clock

hatch 1 [
  table:clear family
  table:put family "male-infans-a" 0
  table:put family "female-infans-a" 0
  table:put family "male-infans-b" 0
  table:put family "female-infans-b" 0
  table:put family "male-juvenes" 0
  table:put family "female-juvenes" 0
  table:put family "male-adultus" 1
  table:put family "female-adultus" 1
  table:put family "male-maturus" 0
  table:put family "female-maturus" 0
  table:put family "male-seniles" 0
  table:put family "female-seniles" 0
  table:clear m-family-clock
  table:put m-family-clock 1 groom-age
  table:clear f-family-clock
  table:put f-family-clock 1 bride-age

  set marriages marriages + 1
]] ] ]
End

```

4.5.5. Aggiornamento dei siti

UPDATE-SITES

- Gerarchia di comando: *go -> **update-sites** -> check-population; migrate*
- Agenti operativi: *site, household*

Il processo racchiude diverse fasi e sottoprocessi. Innanzitutto, tenendo conto che, come già menzionato, la sopravvivenza degli agenti-sito, il loro comportamento nella simulazione,

l'estensione o contrazione del loro bacino di approvvigionamento dipendono strettamente dalla popolazione presente al loro interno, viene verificato che la quantità presente sia sufficiente (*check-population*) a giustificare l'esistenza dell'abitato in quanto tale. In secondo luogo, vengono chiamati in causa i siti in cui l'insoddisfazione del fabbisogno alimentare supera il limite di sopportazione stabilito, più precisamente, quando il numero di valori superiori a 0 all'interno della lista *hunger* supera la soglia *hunger-threshold* (stabilita dall'utente accedendo all'interfaccia). Ciascun valore all'interno della lista riporta la quantità di individui il cui fabbisogno individuale stagionale non è stato soddisfatto (ogni valore corrisponde ad una stagione, dalla più recente alla meno recente, tenendo conto di un arco temporale di riferimento di 3 anni). Il valore minimo (e superiore a 0) di *hunger* esprime quindi il numero di individui che ha sofferto per più tempo la denutrizione; tale cifra viene suddivisa per 6 (numero medio di componenti previsto in una famiglia), ricavando così un numero minimo di famiglie (variabile locale: *hungered-households*) per cui la mancanza di cibo ha reso insostenibile la loro permanenza nell'insediamento. Le *households* così individuate, denominate *migrant-households*, avranno come scopo trovare un altro sito che possa accoglierle. Se sono presenti siti che soddisfino i presupposti per il trasferimento (agentset: *better-places*), quelli aventi una maggior riserva stagionale (al netto del proprio fabbisogno locale) accoglieranno un numero di famiglie (variabile locale *immigrants*) che sono in grado di sfamare; il parametro di riferimento in questo caso è *migration-capacity*, stabilita come percentuale della propria attuale popolazione. Esistono due possibili criteri in base a cui sono individuati i siti idonei ad una migrazione (cfr. *Design concepts, Fitness*) sono:

- *Migrate to welthier sites*: i siti idonei alla migrazione devono avere *hunger* (valore medio della lista) superiore alla media dei siti attivi nel sistema; la loro *migration-capacity* in questo caso corrisponde al 2%
- *Migrate to self-sufficient sites*: i siti idonei alla migrazione devono avere all'interno della lista *hunger* una quantità di valori oltre lo 0 inferiore alla soglia *hunger-threshold*; la loro *migration-capacity* è fissata al 10%
- *Migrate to sites with surplus*: i siti idonei alla migrazione devono avere una riserva stagionale superiore al proprio fabbisogno locale; la loro *migration-capacity* corrisponde al loro surplus

le *household* hanno come attributo *new-home* una sequenza di punti interrogativi (uno per stagione trascorsa in attesa di una nuova sistemazione) con un limite massimo stabilito dall'utente *homeless-threshold*. Se entro questa soglia una *household* non trova un sito dove trasferirsi, essa viene rimossa dal sistema.

```

to update-sites

ask sites [check-population]
let hungered-sites sites with [length filter [h -> h > 0]
hunger > hunger-threshold]
ask hungered-sites [
    let hungered-households int (min filter [h -> h
> 0] hunger / 6 )
    ifelse hungered-households < count households-
here
        [ask n-of hungered-households households-here
[set new-home word new-home "?"]]
        [ask households-here [set new-home word new-
home "?"]]
    ]
set migrant-households households with [member? "?" new-
home]

if any? migrant-households [
set better-places sites with [last hunger = 0]
ifelse migration = "migrate to wealthier sites"
    [set better-places sites with [mean hunger > mean [mean
hunger] of sites]]
    [ifelse migration = "migrate to self-sufficient sites"
        [set better-places sites with [length filter [h -> h >
0] hunger < hunger-threshold]]
        [set better-places sites with [seasonal-reserve >
((need-of-cereals-per-person + need-of-meat-per-person) *
population)]]] ; migration = "migrate to sites with
surplus"

if any? better-places [
    let sorted-better-places sort-on [seasonal-reserve -
((need-of-cereals-per-person + need-of-meat-per-person) *
population)] better-places
    foreach sorted-better-places [S -> ask S [
        ifelse migration = "migrate to wealthier sites"
            [set migration-capacity round (population * 2 /
100)]
            [ifelse migration = "migrate to self-sufficient
sites"

```

```

[set migration-capacity round (population *
10 / 100)]
[set migration-capacity round ((seasonal-
reserve - (((need-of-cereals-per-person + need-of-meat-
per-person) * population) / 6)))]
let potential-immigrants migrant-households
with [min-one-of better-places [distance self] = myself]
ifelse count potential-immigrants >=
migration-capacity
[let immigrants min-n-of migration-capacity
migrant-households [distance myself]
set new-home myself
migrate]
set migrant-households migrant-households with
[member? "?" new-home]
]
[ask migrant-households [
set new-home myself
migrate]
]]
]
]

ask migrant-households [
ifelse my-home = 0 or my-home = nobody
[if length new-home > homeless-threshold [die]]
[ifelse [length filter [h -> h > 0] hunger] of my-home
< hunger-threshold-2
[set new-home ""]
[move-to one-of patches with [my-site = 0]
ask my-home [set my-households households-here]
set my-home 0] ] ]
set migrant-households households with [member? "?" new-
home]
]
End

```

CHECK-POPULATION

- Gerarchia di comando: *go* -> *update-sites* -> ***check-population***
- Gerarchia agenti operativi: *site* -> *household*; *patch*

E' la prima operazione effettuata all'interno del processo di aggiornamento dei siti, in cui si verifica che la popolazione adulta presente in loco sia in un numero superiore o uguale a 20 (soglia stabilita arbitrariamente al di sotto della quale si considera che un insediamento perda la propria identità divenendo una comunità residuale). Nel caso il conteggio risulti inferiore a tale soglia, il sito si disattiva attraverso le seguenti operazioni: le *household* ancora presenti

vengono svincolate e cercheranno una nuova sistemazione, le patch di pertinenza a loro volta resetteranno il proprio attributo *my-site* e, se destinate alla produzione, cambieranno la loro identità in “*grass*”. Infine, il sito scompare dal sistema.

```

to check-population
  if tot-female-adultus + tot-male-adultus < 20 [
    ask households-here [set my-home 0 set new-home "?"]
    ask crops [become-grass]
    ask pastures [become-grass]
    ask site-area [become-grass]
    ask my-patches [set my-site 0]
    die
  ]
End

```

MIGRATE

- Gerarchia di comando: *go -> update-sites -> migrate*
- Gerarchia agenti operativi: *household -> site*

Questo sottoprocesso consiste nel trasferimento di una famiglia in un nuovo sito. Una volta spostatasi, se essa proviene da un sito ancora attivo, quest’ultimo aggiornerà il proprio attributo di popolazione (*update-population*) sottraendo la famiglia migrante, che a sua volta assumerà come *my-home* il nuovo sito di appartenenza.

```

to migrate
  move-to new-home
  if my-home != nobody and my-home != 0 [ask my-home
    [update-local-population]]
  set my-home new-home
  set new-home ""
  ask my-home [update-local-population]
  set migrations migrations + 1
end

```


6. Calibrazione e *testing* preliminare

Se un alto livello di risoluzione consente di intervenire su una moltitudine di fattori, e dunque di osservare un maggior numero di aspetti dell'universo ricostruito, chi scrive è d'altro canto consapevole che la stesura (sicuramente in alcuni casi macchinosa) di un così grande numero di processi comporta anche il rischio, non indifferente, di creare artefatti più o meno consapevoli che devono essere attentamente considerati per non incorrere in errate valutazioni. Un bilancio oggettivo su vantaggi e svantaggi di questa scelta richiede probabilmente di disporre di un modello maggiormente funzionale che, principalmente a causa dei limiti di chi l'ha sviluppato, non è al momento disponibile. Una sperimentazione preliminare attraverso alcune osservazioni e test mirati ha tuttavia già permesso di trarre delle considerazioni sul potenziale e sui limiti dell'esperimento.

Eccessiva improduttività

Un problema evidente, riscontrato nel corso di una prima serie di test (minimo 20 *runs*), che si è manifestato a livello macroscopico con un'anomala brevità del ciclo vitale dei siti (scomparsa totale dal sistema in un arco temporale di circa 20 anni/80 *ticks*), è legato al processo di produzione e in particolare alla stima stagionale della produttività. Un monitoraggio dei parametri produttivi delle *patch* ha infatti messo in luce un impatto eccessivamente aggressivo della secchezza del suolo (anche senza forzare la siccità nel sistema) sul rendimento agricolo, o più precisamente sulla produttività del suolo. Ciò dipende in parte da una tendenza intrinseca del modello a sottostimarne l'umidità anche mantenendo un "regolare" livello di piovosità. Il livello della falda si è rivelato, per il calcolo dell'umidità del suolo, un fattore cruciale ed eccessivamente sensibile: anche oscillazioni che rientrano in un range di normalità possono portare l'umidità del suolo a un valore 0, azzerando di conseguenza anche il ciclo produttivo. Pur tenendo conto della *expertise* locale in fatto di gestione dell'apporto idrico nei campi (irrigazione/regimentazione) già in antichità, si ritiene che le anomalie riscontrate dipendano sostanzialmente dalla semplificazione di una serie di fattori che, con i dati disponibili, non è stato possibile rappresentare abbastanza fedelmente né semplificare nel modo più appropriato. Per limitare questo effetto "scomodo" e ottenere un rendimento colturale più verosimile, il codice nel processo *compute-productivity* è stato modificato come descritto nella sezione relativa alla stocasticità: in caso di assenza di umidità una cella ha comunque il 50% di probabilità di mantenere attiva la produzione (anche se a un livello minimo). Il calcolo della produttività è stato comunque concepito tenendo in considerazione anche altri fattori, come il numero di lavoratori presenti e le temperature medie stagionali, che nei test effettuati sono risultati di norma al di sopra del livello minimo: ciò contribuisce a "smorzare" eventuali crolli drastici della produttività in condizioni "normali" (cioè in assenza di sollecitazioni climatiche intenzionali del sistema). Non avendo modo di sapere (neanche mediante calibrazione) l'effettiva importanza di questi fattori nel successo dell'attività agricola nell'età del bronzo, questi sono (per semplificazione) ugualmente considerati, dunque non ponderati nel computo di una produttività stagionale. Pur trattandosi di una semplificazione potenzialmente troppo deterministica, questa soluzione è stata mantenuta in quanto funzionale a contribuire alla stabilità della simulazione.

Siccità "indesiderata"

Un altro errore riscontrato meno evidente, ma che causava un eccesso di siccità imprevisto era dovuto alla scelta del parametro di riferimento per l'oscillazione della falda, inizialmente fissato come una media delle piovosità stagionali di riferimento (derivate dai dati mappali PaleoClim). Il valore si è rivelato eccessivamente elevato, per ottenere un'oscillazione attorno a livelli stabili per un numero di cicli accettabili (min 300 cicli) è stato inserito un parametro regolabile (*reference-precipitation*) e calibrato, sulla base di una serie di 30 osservazioni (300 *runs* ciascuna), ad un valore di 155, tenendo conto di un livello di partenza della profondità della falda a 1m. Questo settaggio, confrontato con altri valori in un range compreso tra 150 e 170, ha dato infatti i migliori risultati: la profondità della falda, nell'arco temporale considerato per questo test, si è tendenzialmente mantenuto entro livelli ritenuti idonei per la simulazione (ossia inferiori a 200 e superiori a 20). Si sono tuttavia riscontrate, anche in questa modalità, alcune anomalie: in 4 casi il valore è sceso entro i 300 *ticks* al di sotto dello 0, e in un caso è salito eccessivamente (oltre i 250 cm). Trattandosi di un margine di errore, considerato il campione in esame, comunque non così trascurabile (oltre il 10%), si è ritenuto opportuno, pertanto, apportare una modifica al codice fissando in una soglia “di sicurezza” a 30 cm, che consente comunque di raggiungere un livello di umidità del suolo massimo, ma evita macroscopici “incidenti di percorso”.

```
if watertable <= 30 [set watertable 60]
```

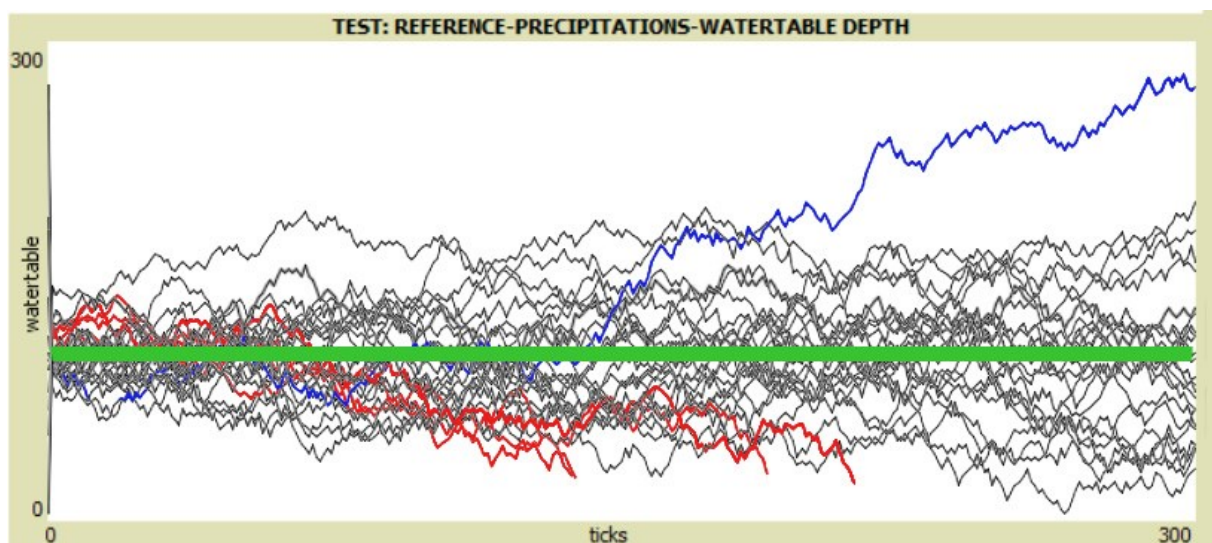


Fig. 28. Visualizzazione d'insieme del test effettuato sul modello per calibrare il parametro reference-precipitation per la regolazione l'oscillazione della profondità della falda. Le anomalie in negativo sono segnate in rosso, mentre in colore blu è tracciata l'anomalia positiva.

Decimazione “spontanea” della popolazione

Il fattore più problematico e insidioso riscontrato in questa versione preliminare di AMPBV SIMULATOR è associato tuttavia alla presenza di popolazione nel sistema, e senz'altro dovuto ad un bug (al momento purtroppo non ancora individuato) nel processo demografico e probabilmente associato alla natalità. L'effetto di tale errore si manifesta, sulla base dei test effettuati, all'incirca al trascorrere di 40-50 anni e comporta una riduzione drastica della popolazione che determina, conseguentemente, la morte degli insediamenti. Pur avendo tentato di modificare e semplificare alcuni sottoprocessi (sia di natalità che mortalità), la curva del popolamento ha sempre manifestato, grossomodo, il medesimo andamento. Anche se il “tempo di decadimento” della popolazione corrisponde all'incirca all'arco temporale che si intendeva osservare, i valori demografici risultano troppo inaffidabili per sollecitare il modello simulando, ad esempio, l'effetto di un'accesa conflittualità interna oppure di un'epidemia. Allo stato attuale dello sviluppo il modello è pertanto inadatto ad essere “forzato” in tal senso; proprio questo effetto, certamente inatteso e indesiderato, ha tuttavia portato ad alcune considerazioni di un certo interesse osservando l'andamento demografico e la sopravvivenza dei siti nel test comparativo che è stato effettuato in via preliminare.

6.1. Una prima sperimentazione di AMPBV SIMULATOR

Scopo dell'esperimento

Lo scopo di questo test preliminare è stato, innanzitutto, testare la funzionalità di AMPBV SIMULATOR da un punto di vista logistico, annotando tempi effettivi di caricamento e svolgimento di un ciclo medio di simulazione per saggiarne la fruibilità. In secondo luogo, si intendeva verificare l'efficacia di una serie di settaggi di riferimento impostati sulla base dei dati raccolti e studiati dalla letteratura in merito al contesto in esame; i parametri impostati per il presente test sono in realtà solo alcune tra le opzioni e combinazioni verosimili tra una molteplicità di ipotesi formulate. AMPBV SIMULATOR è stato concepito proprio per poter

esplorare tutte (o comunque una buona parte di) queste possibilità, che troveranno auspicabilmente un degno spazio di analisi in un futuro lavoro più espressamente orientato al *testing* del modello, idealmente dopo aver risolto le criticità “residuali” precedentemente menzionate. Entrando maggiormente nel merito della simulazione e dello specifico scenario d’indagine, l’obiettivo del test è quello di osservare e quantificare alcuni aspetti-chiave che caratterizzano il nostro sistema effettuando una breve analisi comparativa tra uno scenario, per così dire, “neutro”, quindi preimpostato e non sollecitato nel corso della simulazione, e uno scenario (o meglio, tre scenari) di crisi climatica siccitosa, e valutarne l’impatto sul contesto d’indagine.

Descrizione dell’esperimento

Il test prevede la registrazione dei parametri di osservazione elencati in tre ipotetici scenari:

- 1) Andamento del sistema per una durata di 50 anni in assenza di sollecitazioni
- 2) Introduzione di un fattore di stress climatico siccitoso (*drought*) nel sistema in “fase primordiale” a 5 anni dall’inizio della simulazione, per la durata di 3 anni.
- 3) Introduzione di un fattore di stress climatico siccitoso a 20 anni dall’inizio della simulazione, per la durata di 3 anni.
- 4) Introduzione di un fattore di stress climatico siccitoso a 35 anni dall’inizio della simulazione, sempre per la durata di 3 anni.

Per un dovuto confronto sono stati mantenuti costanti per tutte le simulazioni i parametri di inizializzazione stabiliti, qui a seguito sinteticamente riportati.

RESOURCES		CLIMATE		SURVIVAL		POPULATION	
emmer/spelt-production	6	watertable	80	initial-food-reserve	2	initial-population	125
barley-production	1,5	reference-precipitations	155	hunger-threshold	6	population-increase	2
wheat-production	5,5	temperature-oscillation-range	2	hunger-threshold-2	8	mean-death-age	30
oat-production	1,5	drought-coefficient	0	homeless-threshold	4	migration	welthier-sites
millet-production	10	extra-rainfall-coefficient	0	hunger-factor	on		
crop-maintenance	4			nutrition-factor	on		
max-soil-fertility	50			calamity-coefficient	0		
forest%	0,4						
firewood	0,04						

pastures-per-population	1,5						

Tab.6. Sintesi dei parametri di input impostati per il test

Osservazioni sul test

Ai fini di un'osservazione del comportamento del sistema in risposta ad eventuali induzioni di stress, sono stati registrati:

- Il tempo di sopravvivenza dell'intero sistema dall'"anno 0", ipoteticamente collocabile alle soglie del 1200 a.C., ad un momento di collasso generalizzato
- L'identità degli agenti apparentemente maggiormente resistenti alla crisi, annotando per ogni *run* di simulazione quali sono gli ultimi "sopravvissuti" (ultimi 3 siti presenti nell'universo)
- Il rapporto tra il numero di siti presenti nel sistema e il tempo trascorso

PRESENZA SITI NEL SISTEMA					
TEST	10 anni	20 anni	30 anni	40 anni	50 anni
Senza siccità	13,6	13,5	4,3	2,5	0,8
Siccità a 5 anni	4,2	3	2,2	1,1	0,8
Siccità a 10 anni	13,8	13,2	0,3	0,1	0
Siccità a 20 anni	13,6	12,9	5,1	0,5	0,1

Tab.7. Tabella riassuntiva della presenza residuale dei siti nel sistema.

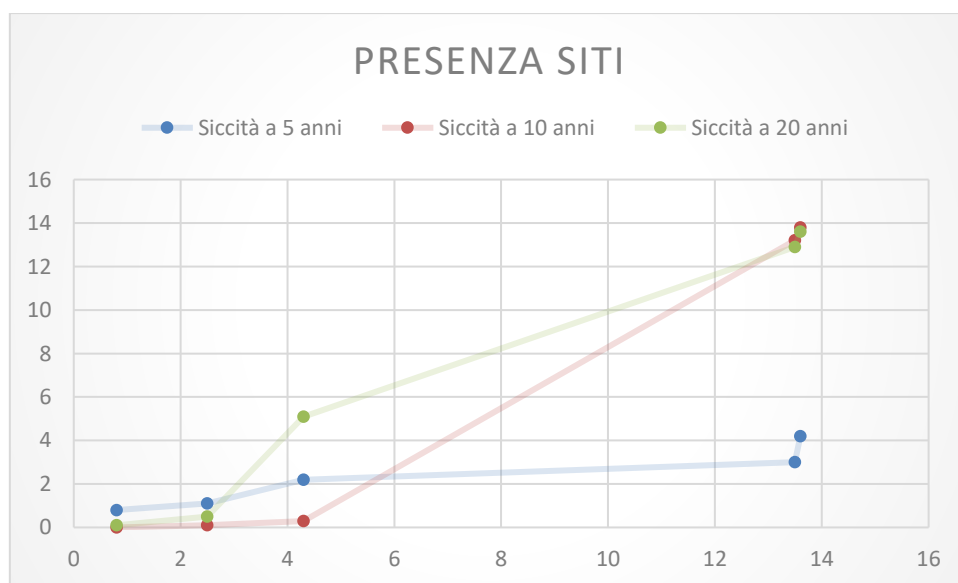


Fig.29. Diagramma di sintesi della sopravvivenza dei siti

Tenendo conto di una spontanea rarefazione (dovuta al *bug* demografico) si osserva, nel test con induzione di stress climatico a 5 anni, una certa capacità di recupero del sistema che apparentemente consente una resistenza generalizzata entro un tempo analogo alla simulazione in assenza di sollecitazioni. Diversamente, sia nel caso di siccità indotta a 20 anni che a 35 anni, il crollo totale avviene in tempi molto più rapidi. Ciò dipende verosimilmente da una maggior vulnerabilità del sistema che, da un lato, contiene un'assai minor presenza di agenti e dall'altro è già possibilmente reso più vulnerabile per via di un impoverimento del suolo già in uno stadio più avanzato.

SITO	estensione (ha)	SICCITA A 5 ANNI			SICCITA A 35 ANNI			SICCITA A 35 ANNI		
		terzul timo	penult timo	ultimo	terzul imo	penult imo	ultimo	terzul imo	penult imo	ultimo
Castel di Maccacari	8	0	3	2	2	1	3	2	1	3
Fabbrica dei Soci	6	7	3	1	7	1	1	5	2	1
Aselogna	2	1	1	1	1	2	0	3	0	1
Castello del Tartaro	12	6	3	2	1	5	5	4	1	4
Fondo Paviani	19	2	7	9	5	2	8	4	3	5
Cop Roman	2	0	0	1	0	0	0	0	1	0
Canova	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Lovara	11	4	3	5	3	6	2	2	9	5
Finilone	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tombola di Cerea	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Venezia Nuova	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mazzagatta	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Stangheletti	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Merlara	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab.8 Tabella riassuntiva della resistenza dei siti all'interno del sistema, in cui è indicato per ciascuno il numero di test in cui sono risultati terzultimo, penultimo e ultimo "sopravvissuto".

Per quanto riguarda la selettività con cui sopravvivono i siti, non si riscontrano particolari differenze tra uno scenario e l'altro. Sembra abbastanza evidente, tuttavia che l'aspetto dimensionale (con le dovute eccezioni) risulti un fattore decisivo nella loro probabilità di sopravvivenza (i siti che sembrano resistere maggiormente sono Castello del Tartaro, Lovara e Fondo Paviani). In presenza di siccità indotta (oppure, occasionalmente, anche in stati di crisi prematura insorti spontaneamente nel sistema allo stato neutrale), la curva di sopravvivenza dei siti assume spesso un andamento semi-iperbolico che si associa ad una prematura decimazione degli agenti e, contestualmente, ad una sopravvivenza maggiormente protratta del sito sopravvissuto (che, con maggior probabilità, si dimostra essere uno dei centri abitati maggiori, in cui si riversa, evidentemente, una parte della popolazione residuale

proveniente dai vicini già collassati. Forse perché in assenza di competitori per il proprio spazio di sopravvivenza questi attraversano una fase “pre-implosiva” di espansione, e anche la popolazione, precedentemente andata incontro ad un calo generalizzato, vive un breve momento di ripresa.

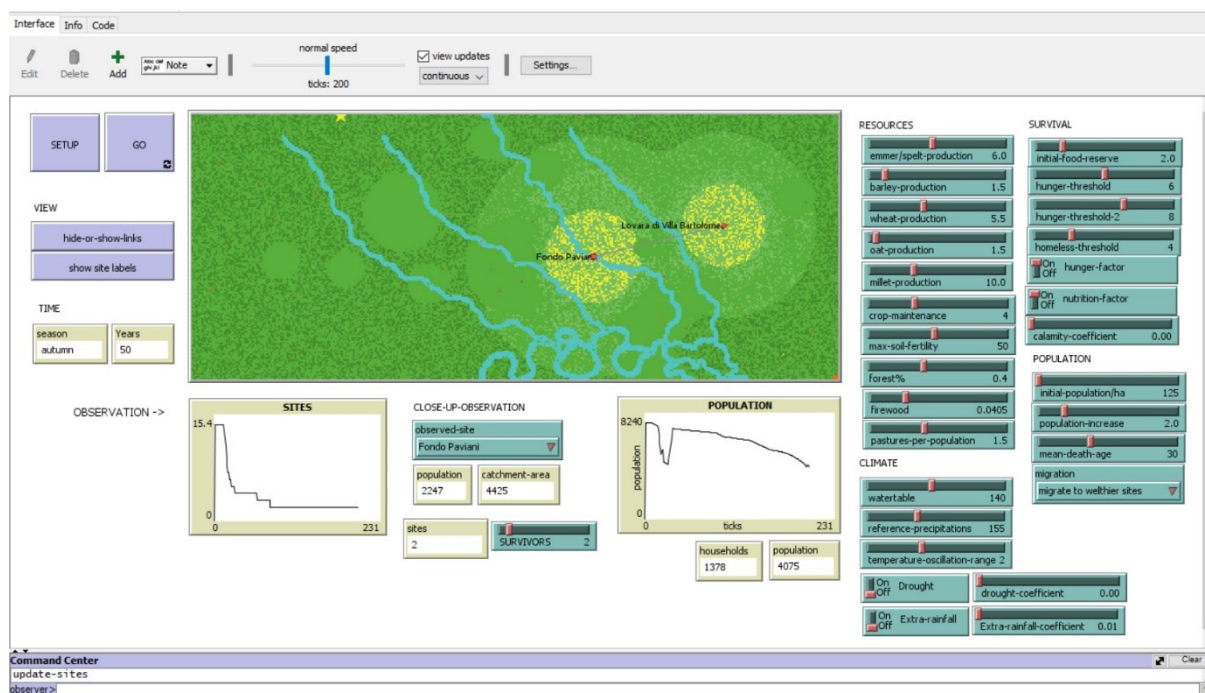


Fig. 30. Interfaccia del modello durante uno dei test.

7. Conclusioni

7.1. Considerazioni e idee di sviluppo per il modello

La sperimentazione sinora effettuata, ancora parziale (il numero di test è esiguo per poter estrapolare un dato robusto) e su un sistema ancora precario dal punto di vista funzionale, non consente di trarre conclusioni sicure sui risultati. Concedendosi, tuttavia, una suggestione forse azzardata, un dato preliminare che deriva da quanto osservato è che, in presenza di un fenomeno critico di stress come può essere stata una crisi climatica (anche di breve durata ma imposta su un sistema in qualche modo già possibilmente precario), comunità maggiormente “attrezzate” anche solo sotto l’aspetto demografico e dimensionale potrebbero

avere avuto, oltre a (logicamente) un più ampio margine di sopravvivenza dato da un maggior numero di abitanti, un'ulteriore "spinta" demografica da fenomeni migratori locali in seguito a una crisi generalizzata, per incorrere in un momento non molto successivo al medesimo destino. Non avendo adeguatamente considerato molti altri aspetti come il collocamento dell'oggetto di indagine nel suo più ampio contesto geografico in evoluzione e avendo, per ora, solo abbozzato aspetti cruciali come i flussi di scambi a medio e (soprattutto) ampio raggio, è ancora impensabile concludere se quanto osservato in questa simulazione preliminare sia indiziario di "code larvali di sopravvivenza" (De Guio 2021, p.126) nel sistema della Bassa pianura Veronese. Si auspica, tuttavia, che tali osservazioni possano essere da spunto per ulteriori riflessioni su una problematica complessa come il collasso delle Terramare e sul potenziale di nuovi strumenti di lettura del fenomeno.

Proponendo invece alcune considerazioni più strettamente pertinenti allo sviluppo del modello, come già menzionato in merito ad una varietà di aspetti sia tecnici che scientifici, lascia senza dubbio ampio spazio di miglioramento che, dato il livello di complessità, potrebbe portare, in una nuova e più ricca sperimentazione, a risultati e osservazioni differenti: Si ritiene quindi opportuno sintetizzare brevemente quelli che sono i limiti principali di AMPBV SIMULATOR, riscontrati in fase di *testing* e calibrazione o determinati da scelte a priori in fase di sviluppo.

- In una fase più matura e una volta risolte le maggiori criticità tecniche, sarebbe opportuno effettuare una più sistematica calibrazione del modello che, in questa sede, ha riguardato solo alcuni aspetti più macroscopici.
- Alcuni processi stabiliti per il modello presentano margini di ulteriore sofisticazione, senza necessariamente andare ad incrementarne il peso o la complessità. La modalità di espansione e contrazione del territorio di pertinenza degli agenti, ad esempio, segue una forma circolare, che se per una fase di occupazione pioniera o di pre-organizzazione strategica potrebbe essere una semplificazione adeguata in un momento storico di così alto grado di sviluppo rappresenta forse un'approssimazione troppo limitante. Sarebbe interessante in futuro, da questo punto di vista, tentare di applicare anche criteri differenti (ad es. Voronoi, distanze ponderate secondo criteri specifici ecc.)

- Aspetti legati alla sopravvivenza, come ad esempio il consumo e il fabbisogno alimentare, non sono (intenzionalmente) pienamente rappresentati. Nella simulazione non si tiene conto di una varietà di prodotti, sia animali che vegetali, che dovevano essere un'importante integrazione della dieta degli individui e che potrebbero avere avuto un ruolo fondamentale nel corso degli eventi storici. Similmente, anche nello scambio è contemplata una selezione decisamente esigua di beni.
- Il numero di fattori di cui si è tenuto conto, nell'ottica di un macro-modello multifattoriale in logica palesemente “*KIDS*”, è dunque senz'altro ancora limitato. Il tempo e le possibilità tecniche del software in primis, ma anche e soprattutto le potenzialità della macchina e dello sviluppatore, hanno consentito di tenere in considerazione, per ora, solo degli aspetti più macroscopici. Una stesura del codice più economica e performante potrebbe dare un certo margine di sviluppo in tal senso, ammesso (e non concesso) che valga la pena combinare in un unico modello un grande numero di aspetti così dettagliatamente descritti
- Sussistono (e questo è probabilmente, al momento, l'ostacolo più problematico) degli errori (precedentemente descritti) di programmazione che consentono un impiego ancora troppo limitato del modello a scopo analitico.
- L'area d'indagine per questa prima versione di AMPBV SIMULATOR è ancora molto limitata. Se uno scenario di simulazione circoscritto, sia sul piano geografico che cronologico, consente un'esplorazione in maggior dettaglio, un'applicazione su più ampia scala potrebbe consentire una miglior visione d'insieme
- Come già affermato nell'introduzione generale, il modello è estremamente pesante e dunque non solo limita lo sviluppatore nell'idea di ulteriori espansioni, ma risulta di utilizzo poco agevole da parte di un'utenza esterna che voglia utilizzarlo. Per un'efficace sperimentazione, la quale esige un numero di reiterazioni molto elevato. I tempi di caricamento, come precedentemente menzionato, sono significativi: la macchina con cui è stato sviluppato e testato AMPBV SIMULATOR, dotata di processore *Intel Core i5-8265U* e CPU con velocità di *clock* 1.80 GHz, 8 Gb di RAM e scheda grafica dedicata (*Nvidia GeForce MX150*) richiede approssimativamente 3 minuti e 20 secondi in fase di caricamento (procedura di *setup*) e tra 5 e 10 secondi circa per il completamento di un ciclo (procedura *go*, la cui variabilità nei tempi è maggiore in quanto dipende dal numero di processi condizionali che vengono attivati).

- La complessità (e complicatezza?) nel suo insieme e in alcuni casi dei singoli processi implementati è tale da rendere difficoltoso comunicare il meccanismo del modello, anche fornendone descrizione all'interno di un protocollo formalizzato e ormai “rodato” come il protocollo ODD. Poiché la comunicazione del metodo è fondamentale per un'appropriata recezione dei risultati, anche questa può essere ritenuta una criticità non trascurabile.

Tra le possibili idee di miglioramento e sperimentazione per il futuro di AMPBV SIMULATOR, sarebbe senz'altro utile ed interessante rappresentare con migliore accuratezza l'ambiente in cui e con cui operano gli agenti (ad esempio, con una più curata ricostruzione della distribuzione boschiva, o tentando di integrare nel paesaggio, seppur sempre con un ampio margine di incertezza, un sistema paleoidrografico più dettagliato) o anche gli agenti stessi, dotandoli di attributi caratterizzanti che possano portare all'emergenza di comportamenti più verosimili. Una possibilità per far fronte ai limiti tecnici di pesantezza potrebbe essere quello di sviluppare moduli separati da cui estrapolare output da implementare in un modello più schematico. Trattandosi di *Agent-Based-Modeling*, ovvero di un tipo di simulazione che prevede un'analisi dell'emergenza di fenomeni dal particolare al generale, un simile proposito richiede certamente, a sua volta, estrema attenzione e dovute riflessioni nella sua concezione, che non ne nega tuttavia un potenziale e interessante percorso di sviluppo. Una ripartizione ragionata o una maggiore astrazione del modello aprirebbe, oltretutto, la strada a possibilità che nel corso del progetto di ricerca sono state tentate, ma in ultima istanza accantonate proprio per scarsa applicabilità, anche per via di un'area d'indagine (intenzionalmente, per questa prima sperimentazione) ancora limitata, come l'analisi di flussi di scambio più ad ampio raggio e di processi di trasmissione della cultura materiale. Per come è attualmente concepito AMPBV SIMULATOR, risulta difficile estendere l'analisi su una scala molto più ampia senza incorrere in un collasso, in questo caso, dello strumento informatico stesso. Il considerare molteplici aspetti della realtà, in particolare di una realtà passata e remota come quella dell'età del Bronzo comporta l'acquisizione e la ponderazione di un gran numero di dati, che implica senz'altro un ragguardevole impegno nella raccolta, organizzazione, valutazione ed eventualmente il trattamento degli stessi. In una prospettiva della ricerca archeologica ciò comporta comunque, piuttosto che un limite, uno stimolo interessante a cercare, come già viene fatto ormai da oltre un secolo per il mondo terramaricolo, quante più informazioni possibili in una prospettiva idealmente (e ormai

necessariamente) interdisciplinare e, secondo quello che è da sempre lo spirito del progetto AMPBV, tentando anche strade innovative e inesplorate.

7.2. Catastrofe, rivoluzione, evoluzione? Riflettendo sull'archeologia della complessità...

Jared Diamond, interessatosi al progetto Artificial Anasazi e ai suoi risultati (Diamond, 2002), osservò come in assenza delle numerose quantità di dati relativi a precipitazioni, acque sotterranee, tipi di suolo, rendimenti delle colture e al comportamento antropico, un'affermazione meramente verbale come "*Gli Anasazi hanno abbandonato la loro patria a causa della siccità*" avrebbe tante probabilità di essere errata quanto corretta. Se "Dio è nei dettagli", l'intento di comprendere la realtà attraverso la modellazione (e in particolare attraverso una modellazione di tipo *bottom-up*) è importante disporre di quante più informazioni possibili. Ciò dovrebbe, almeno in parte, fugare i timori degli archeologi (e non solo) più scettici all'interno della comunità scientifica, che sembrano guardare al farsi strada di nuove tecniche informatiche come ad un'incombente "rivolta delle macchine" che renderà obsoleta la raccolta di dati e ne soppianderà l'interpretazione secondo le competenze e l'"umana sensibilità" degli addetti ai lavori. Un altro aspetto che lo studioso osservò in questa esperienza è che le traiettorie prese delle società umane nella storia sono altamente complesse, al punto che una modellazione può rendersi fondamentale per valutare le conseguenze di una combinazione dei fattori, antropici e ambientali, indicati o suggeriti dai dati reali. Le simulazioni che contemplano una moltitudine di parametri di input sono a volte viste con scetticismo nel mondo dei programmatori; d'altro canto, se la robustezza e la variabilità di questi parametri sono adeguatamente valutati e calibrati il modello che li utilizza sarà in grado di rendere comprensibili presupposti ed effetti che sono difficilmente considerabili, nel loro complesso e nella loro complessità, senza uno strumento di supporto (Diamond 2002, p.569). La prima affermazione in questa analisi e la stessa esperienza del presente progetto di ricerca portano a considerare, non solo per il contesto delle Long House Valley e non solo per il contesto della Bassa Veronese, i dati tutt'altro che superflui. Se modelli agenziali astratti hanno rivelato tendenze di grande interesse per lo studio anche dei sistemi antropici, un modello riferito ad un preciso complesso reale, anche se passato, non può non confrontarsi anche con dati concreti (per quanto l'intero processo di acquisizione, gestione e interpretazione degli stessi, com'è noto, comporti inevitabilmente i suoi errori e i suoi rischi).

In questa modalità applicativa, anzi, la natura stessa dell'*Agent Based Modeling*, nel suo intento di perseguire l'emergenza di fenomeni di grande entità da fattori di piccola entità, comporta un rischio di generare artefatti a partire da presupposti errati o inadeguati che non può essere assolutamente trascurato. Siano essi desunti da attività archeologica sul campo, in laboratorio o da remoto, o anche derivati da confronti biologici e antropologici nel presente (decenni di studi etnoarcheologici e applicazioni di archeologia sperimentale hanno ampiamente dimostrato l'utilità di questo tipo di informazione), i dati rimangono una componente fondamentale anche per lo studio della complessità e anzi, come ci si dovrebbe prospettare per ogni quesito archeologico, inducono ad esigerne una sempre maggior ricchezza e accuratezza. Per quanto riguarda il presente lavoro e non solo, quindi, non può che essere auspicabile un impegno e una continuità nei progetti di studio e di ricerca, idealmente di carattere quanto più possibile multidisciplinare, che porterà senz'altro a migliori risultati anche nell'ambito della modellazione agenziale. La seconda conclusione di Diamond, che sottolinea l'utilità, anzi la necessità di un mezzo specifico per calcolare una molteplicità di effetti su un sistema complesso (come una società, o anche solo una comunità umana), sottolinea implicitamente il valore dell'*Agent-Based Modeling* dal punto di vista squisitamente scientifico, ovvero come vero e proprio metodo di sperimentazione di fenomeni e sistemi che potrebbero non essere altrimenti riproducibili o testabili. Un aspetto cruciale che rende tale il metodo scientifico è appunto la riproducibilità (Latour e Woolgar 2013; Moonesinghe, Khoury e Janssens 2007; Popper 2005; Simons 2014, per citarne alcuni). Nell'ambito delle cosiddette "scienze esatte" è prassi comune, anzi obbligata pubblicare i dettagli degli esperimenti e delle ricerche effettuate, fornendo una documentazione esplicita del metodo utilizzato per consentire ad altri ricercatori di replicare ed eventualmente estendere le precedenti analisi. In archeologia tener dovutamente fede a questo principio può risultare difficile e talvolta impossibile, se non altro per il fatto che i più tradizionali e diffusi metodi di rilievo e di studio del record archeologico comporta spesso azioni distruttive. I modelli basati su agenti, sotto questo punto di vista, permettono agli archeologi di "*esplorare sistematicamente le nostre ipotesi e sperimentarle*" (Graham 2009, p.2) creando rappresentazioni della realtà passata non più (parzialmente o totalmente) tangibile e di manipolare le variabili all'interno di un sistema semplificato (Carney, Davies 2020) che può essere replicato, alterato e ripristinato un numero infinito di volte. Quello che Diamond manca invece di ponderare nelle proprie considerazioni sull'esperimento di Axtell, e più in generale

sulla modellazione, riguarda due aspetti secondo chi scrive altrettanto cruciali: il potenziale della semplificazione dal punto di vista cognitivo per il ricercatore, e il rapporto stretto, conflittuale e tuttavia irrinunciabile degli archeologi con l'incertezza. Nel primo caso, la semplificazione è sempre un processo indispensabile per chi formula un'ipotesi sulla realtà: aspirare a scorgere il proverbiale battito d'ali di farfalla che ha determinato, indirettamente, un uragano dall'altro capo del mondo è un proposito non solo decisamente troppo ambizioso per chiunque, ma è anche solitamente inutile ai fini dei quesiti d'indagine che un archeologo si può porre per lo studio di uno scenario del passato. Se qualcuno tentasse di abbattere un muro di cemento armato con un pugno, non riterremmo necessario conoscere l'intera struttura molecolare del suddetto muro o la tonicità di ogni muscolo di chi lo colpisce per immaginare l'esito della prova. Certo, esiste la possibilità, ad esempio, che il muro abbia una falla strutturale nascosta e non occorra che una pressione nel punto giusto per farlo crollare, ma se ci trovassimo dinnanzi ad un mucchio di macerie ci limiteremmo a rilevarne il materiale e lo spessore per concludere con sufficiente sicurezza che il muro ha ceduto per altre cause. La semplificazione appartiene al nostro processo cognitivo, ma a volte non solo un difetto, ma anche un eccesso di conoscenze possono indurre a pericolosi pregiudizi nell'interpretazione di un contesto. Un modello costituisce, da questo punto di vista, uno "strumento di pensiero", che costringe sia chi lo elabora sia chi recepisce a stabilire e accettare o meno quelli che possono essere i criteri di valutazione più opportuni, quali possono essere le informazioni più importanti ai fini della comprensione di un sistema: determinare non solo ciò che stiamo osservando ma anche *come* lo stiamo osservando è una procedura cruciale per qualunque tipo di studio, ma che chi modella in modo formalizzato non può esimersi da rendere esplicita. Il concetto non è disgiunto dal secondo fattore trascurato da Diamond, ossia il rapporto con l'incertezza. La consapevolezza, per quanto amara essa possa essere, che alcune informazioni fondamentali per la nostra interpretazione del passato siano irrimediabilmente perdute indurrebbe a limitare la formulazione di ipotesi secondo paradigmi assodati o anche solo a quello che di norma chiamiamo "buon senso", che l'egocentrismo umano tende a considerare, malgrado la storia insegni diversamente, come un terreno comune e condiviso tra gli individui. Se in un modo o nell'altro siamo costretti ad accettare l'incertezza, una cosa è ammetterne l'esistenza, e un'altra cosa è commensurarla, analizzarla, definirne i limiti per dare il giusto peso ad ogni fattore che consideriamo e, in ultima istanza, tentare di spingerci oltre esplorando nuove possibili soluzioni per espandere le nostre conoscenze. L'avvento di

nuove tecnologie e l'abbattimento del costo di strumentazioni sempre più performanti e sofisticate ha fatto maturare anche in ambito archeologico una crescente fiducia in metodi scientifici innovativi. Se da un lato, tuttavia, l'archeologia si è (fortunatamente) aperta con entusiasmo a diversi mezzi per l'estrazione di nuovi dettagli dal record archeologico, benché tutt'altro che esenti da ampi margini di errore (basti pensare alle datazioni radiocarboniche o, in tempi più recenti, alle analisi del DNA), sembra al contrario resistere con una certa diffidenza all'uso di strumenti informatici e matematici per elaborare e testare ipotesi, come nel caso *dell'Agent-Based Modeling*. Al di là della sua applicazione nello specifico caso d'indagine, dunque, l'auspicio con la presente ricerca è quindi quello di contribuire in qualche modo a far conoscere meglio questo tipo di strumenti, e portare ad una più ampia riflessione e discussione scientifica, anche non specializzata, sulle sue potenzialità.

Bibliografia

- ◆ ABELSON R.P., BERNSTEIN A. 1963, *A computer simulation of community referendum controversies*, Public Opinion Quarterly, 27(1), pp. 93–122.
- ◆ ABELSON R.P., CARROLL D.J. 1965, *Computer simulation of individual belief systems*, American Behavioral Scientist, 8: pp. 24–30.
- ◆ AJELLI M., GONÇALVES B., BALCAN D., COLIZZA V., HU H., RAMASCO J. J., VESPIGNANI A. 2010, *Comparing large-scale computational approaches to*

epidemic modeling: agent-based versus structured metapopulation models, BMC Infectious Diseases, 10(1), p.190.

- ◆ ALDENDERFER M.S. 1981, *Computer simulation for archaeology: an introductory essay*, in SABLOFF J.A. (ed.), *Simulations in Archaeology*, Albuquerque, pp. 67–118.
- ◆ AMPOLO C.1980, *La formazione della città nel Lazio. Le condizioni materiali della produzione. Agricoltura e paesaggio agrario* (Roma, 24-26 giugno 1977), *Dialoghi di Archeologia*, II, pp. 15-46.
- ◆ ANDERSSON C., FRENKEN K., HCLLERVIK A. 2006, *A complex network approach to urban growth*, *Environment and Planning A*, 38(10), pp. 1941-1964.
- ◆ ANDREOTTI R., ZANINI A. 1995-96, *L'insediamento di Fossa Nera di Porcari (Lucca)*, *Rivista di Scienze Preistoriche*, XLVII, pp. 291-330.
- ◆ ANGELINI I., CUPITÒ M., BETTINESCHI C., LEONARDI G., MOLIN G. 2010, *Chronological investigation of prehistoric vitreous materials from Veneto by archaeometric analysis*, in *Riflessioni e Trasparenze. Diagnosi e conservazione di opere e manufatti vetrosi* (Congresso Nazionale di Archeometria, Ravenna, 24-26 febbraio 2009), pp. 71-86.
- ◆ ARTURSSON M. 2010, *Settlement Structure and Organization*, in EARLE T, KRISTIANSEN K. (ed.), *Organizing Bronze Age Societies*, United States of America, pp. 87-121.
- ◆ ASPES A., FASANI L. 1968, *Necropoli dell'età del bronzo a Franzine Nuove di Villabartolomea (Verona)*, *Memorie del Museo Civico di Storia Naturale di Verona*, XVI, pp. 455-482.
- ◆ ASPES A., SALVATORI S. 1972, *Materiali preistorici provenienti da Perteghelle di Cerea (Verona)*, *Memorie del Museo Civico di Storia Naturale di Verona*, XX, pp. 227-261.
- ◆ AUCHINCLOSS A.H., GARCIA L.M.T. 2015, *Brief introductory guide to agent-based modeling and an illustration from urban health research*, *Cadernos de Saúde Pública* (Online), v. 31, pp. 65-78.
- ◆ AXELROD R., 1984, *The evolution of cooperation*, New York.
- ◆ AXTELL R.L., EPSTEIN J.M., DEAN J.S., GUMERMAN G.J., SWEDLUND A.C., HARBURGER J., CHAKRAVARTY S., HAMMOND R., PARKER J., PARKER M. 2002, *Population Growth and Collapse in a Multi-Agent Model of the Kayenta Anasazi in Long House Valley*, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99(3): pp. 7275-7279.
- ◆ BAGGIO P., BASSO P., MARCHIORI A., ROSADA G. (a cura di), ZAMBONI C. 1992, *Il "survey" archeologico a Val Nova di Castagnaro nelle Valli Grandi Veronesi: una questione di metodo per una ipotesi di scavo*, in CÀSSOLA GUIDA P, ROSADA G. (a cura di), *Tipologia di insediamento e distribuzione antropica nell'area veneto-istriana dalla protostoria all'alto medioevo* (Atti del seminario di studio, Asolo 3-5 novembre 1989), Monfalcone, pp. 259-276.

- ◆ BAGOLAN M., LEONARDI G. 2000, *Il Bronzo finale nel Veneto*, in HARARI M., PEARCE M. (a cura di), *Il Protovillanoviano al di qua e al di là dell'Appennino. Atti della giornata di studio*, Como, pp. 15-46.
- ◆ BALBI S., GIUPPONI C., PEREZ P., ALBERTI M., 2013, *A Spatial Agent-Based Model for Assessing Strategies of Adaptation to Climate and Tourism Demand Changes in an Alpine Tourism Destination*, *Environmental Modelling & Software*, 45, pp. 29-51.
- ◆ BALENSI J., MONCHAMBERT J.Y., MULLER CELKA S. (a cura di) 2004, *La Céramique mycénienne de l'Égée au Levant. Hommage à Vronwy Hankey*, Table ronde internationale (Maison de l'Orient et de la Méditerranée, 20 mars 1999).
- ◆ BALISTA C. (a cura di), DE GUIO A., VANZETTI A., BETTO A., DE ANGELI G., SARTOR F. 2006, *La fine dell'età del bronzo ed i processi di degrado dei suoli innescati dai reinsediamenti della prima età del Ferro e dai deterioramenti climatici del sub-Atlantico al margine settentrionale delle Valli Grandi Veronesi (il caso-studio del sito di Perteghelle di Cerea-VR)*, Padusa, XLII, Pisa – Roma, pp. 45-128.
- ◆ BALISTA C. 1996, *Geoarcheologia delle Formazioni superficiali: linee guida e casi studio dal progetto AMPBV. I risultati di una ricerca volta al definitivo inquadramento stratigrafico delle "strade su argine" delle Valli Grandi Veronesi*, in MARAGNO E. (a cura di), *La ricerca archeologica di superficie in area padana. Atti del Workshop - Villadose, 1 ottobre 1994*, Stanghella, pp. 319-349.
- ◆ BALISTA C. 1997, *Elementi di inquadramento stratigrafico e paleoambientale dell'areale delle Valli Grandi Veronesi meridionali. Uno scenario per l'emergenza dei grandi siti di impianto terramaricolo dell'età del bronzo media-recente*, in BALISTA C., DE GUIO A. 1997, *Ambiente ed insediamenti dell'età del bronzo nelle Valli Grandi Veronesi*, in BERNABÒ BREA M., CARDARELLI A., CREMASCHI M. (a cura di), *Le terramare. La più antica civiltà padana*, Milano, pp. 137-147.
- ◆ BALISTA C. 1998, *Geoarcheologia dell'area palafitticola della torbiera bassa di Canàr ed evoluzione pedo-alluvionale delle sequenze di riempimento del suo antico bacino fluviolacustre*, in BALISTA C., BELLINTANI P. (a cura di), *Canàr di San Pietro Polesine. Ricerche archeo-ambientali sul sito palafitticolo*, Padusa Quaderni, 2, pp. 31-103.
- ◆ BALISTA C. 2005, *Territorio, insediamenti e cicli di alluvionamento generalizzato tra la fine dell'età del bronzo e gli inizi dell'età del ferro nelle Valli Grandi Veronesi meridionali*, in BALISTA C., DE GUIO A., VANZETTI A., BETTO A., DE ANGELI G., SARTOR F. 2005, *Paleoidrografie, impianti terramaricoli e strade su argine: evoluzione paleoambientale, dinamiche insediative e organizzazione territoriale nelle Valli Grandi Veronesi alla fine dell'età del bronzo*, Padusa, XLI, pp. 118-138.
- ◆ BALISTA C. 2007, *Paleoidrografie padani minori, terramare e antichi percorsi del fiume Po nella bassa pianura mantovana*, *Annali Benacensi*, XIII-XIV, pp. 35-72.
- ◆ BALISTA C. 2009, *Le risposte del sistema paleoidrografico di risorgiva delle Valli Grandi Veronesi Meridionali alle fluttuazioni climatiche tardooloceniche e agli impatti antropici legati ai cicli insediativi dell'età del Bronzo, di età romana e di età*

tardo rinascimentale moderna, Padusa, XLV, Nuova Serie, 2009, Pisa - Roma, pp. 73-131.

- ◆ BALISTA C. 2013, *Dal Po di Adria al fiume Tartaro: trasformazioni paleoidrografiche tra l'età del bronzo e l'età del ferro attraverso le evidenze petrografiche dei sedimenti del sito dell'Amolara Di Adria (RO)*, Padusa, XLIX, pp. 159-192.
- ◆ BALISTA C. 2018, *The Po di Adria, Frattesina and the Po Delta between the Middle-Recent Bronze Age and the Early Iron Age*, IpoTESI Di Preistoria, 10(1), pp. 143-198.
- ◆ BALISTA C., BAGOLAN M., CAFIERO F., DE GUIO A., LEVI S.T., VANZETTI A., WHITEHOUSE R., WILKINS J. 1998, *Bronze-Age "Fossil Landscapes" in the Po Plain, Northern Italy*, (1998), in *Mensch und Umwelt in der Bronzezeit Europas*, Berlino, pp. 493-499.
- ◆ BALISTA C., BELLINTANI P. (a cura di) 1998, *Canàr di San Pietro Polesine. Ricerche archeoambientali sul sito palafitticolo*, Padusa Quaderni, 2, Stanghella (PD).
- ◆ BALISTA C., BLAKE H., DE GUIO A., HOWARD DAVIS C., HOWARD P., WHITEHOUSE R.D., WILKINS J. 1986, *Progetto Alto Polesine. Marzo-Aprile 1986. Relazione preliminare*, Quaderni di Archeologia del Veneto, II, pp. 21-25.
- ◆ BALISTA C., BONDAVALLI F., CARDARELLI A., LABATE D., MAZZONI C., STEFFÉ G. 2008, *Dati preliminari sullo scavo della Terramara di Gaggio di Castelfranco Emilia (Modena): scavi 2001-2004*, in BERNABÒ BREA M., VALLONI R. (Eds.), *Archeologia ad Alta Velocità in Emilia Romagna. Indagini archeologiche e geologiche lungo il tracciato dell'Alta Velocità*, Quaderni di archeologia dell'Emilia Romagna. 22, Firenze, pp. 113 e 138.
- ◆ BALISTA C., BONOMI S., CANTELE A., DE GUIO A., FERRI R., HERRING E., HOWARD DAVIS C., HOWARD P., MAGRO S., MALGARISE A., PERIN L., TONIOLO A., VANZETTI A., WHITEHOUSE R.D., WILKINS J. 1991, *Alto-Medio Polesine- Basso Veronese Project: third report*, Accordia Research Papers, 2, pp. 129-178.
- ◆ BALISTA C., BORTOLAMI F., MARCHESINI M., MARVELLI S., 2016, *Terrapieni a protezione dei campi dall'invasione delle Torbiere nelle Valli Grandi Veronesi nell'età del Bronzo Medio-Recente*, IpoTESI di Preistoria, 8, pp. 53-102.
- ◆ BALISTA C., CAFIERO F., DE GUIO A. 1997, *Castello del Tartaro, Fondo Paviani e Fabbrica dei Soci*, in BERNABO' BREA M., CARDARELLI A., CREMASCHI M. (a cura di), *Le Terramare. La più antica civiltà padana*, Milano, pp. 240-249.
- ◆ BALISTA C., CANTELE G., DE GUIO A., LUCIANI M., MIGLIAVACCA M., WHITEHOUSE R.D., WILKINS J. 1992, *Alto-Medio Polesine- Basso Veronese Project: fourth report*, Accordia Research Papers, 3, pp.135-161.
- ◆ BALISTA C., DE GUIO A. 1990-91, *Il sito di Fabbrica dei Soci (Villabartolomea-VR): oltre la superficie*, Padusa, XXVI-XXVII: pp. 9-85.

- ◆ BALISTA C., DE GUIO A. 1997, *Ambiente ed insediamenti dell'età del bronzo nelle Valli Grandi Veronesi*, in BERNABO' BREA M., CARDARELLI A., CREMASCHI M. (a cura di), *Le terramare. La più antica civiltà padana*, Milano: pp. 126-165.
- ◆ BALISTA C., DE GUIO A., FERRI R., EDWARDS M., HERRING E., HOWARD DAVIS C., HOWARD P., PERETTO R., VANZETTI A., WHITEHOUSE R.D., WILKINS J. 1990, *Alto-Medio Polesine Project: second report*, Accordia Research Papers, 1, pp. 153-187.
- ◆ BALISTA C., DE GUIO A., FERRI R., VANZETTI A. 1992, *Geoarcheologia delle Valli Grandi Veronesi e Bonifica Padana (Rovigo): uno scenario evolutivo*, in CÀSSOLA GUIDA P., ROSADA G. (a cura di), *Tipologia di insediamento e distribuzione antropica nell'area Veneto-Istria dalla Protostoria all'Alto Medioevo*, Venezia, pp. 111-122.
- ◆ BALISTA C., DE GUIO A., VANZETTI A., BETTO A., BOVOLATO C. 2015, Progetto Alto-Medio Polesina Bassa Veronese: “off-site power”: linee di un percorso critico di complessità sociale in LEONARDI G., TINÉ V. (a cura di), *Preistoria e Protostoria del Veneto*, Studi di Preistoria e Protostoria – 2, Firenze, pp. 781-787.
- ◆ BALISTA C., DE GUIO A., VANZETTI A., BETTO A., DE ANGELI G., SARTOR F. 2005, *Paleoidrografie, impianti terramaricoli e strade su argine: evoluzione paleoambientale, dinamiche insediative e organizzazione territoriale nelle Valli Grandi Veronesi alla fine dell'età del Bronzo*, in Padusa, XLI, Pisa-Roma, pp. 97-151.
- ◆ BALISTA C., LEONARDI G. 2003, *Le strategie d'insediamento tra II e inizio I millennio a.C. in Italia settentrionale centro-orientale*, in *Le comunità della preistoria italiana. Studi e ricerche sul Neolitico e l'Italia dei metalli*. Atti XXXV Riunione Scientifica IIPP (Lipari 2-7 giugno 2000), Firenze, pp. 159-172.
- ◆ BARATELLA V., CUPITÒ M. 2015, *Le tombe a incinerazione della necropoli di Olmo di Nogara (Verona): una revisione cronologica dei materiali ceramici*, in LEONARDI G., TINÉ V. (a cura di), *Preistoria e Protostoria del Veneto*, Studi di Preistoria e Protostoria – 2, Firenze, pp. 781-787.
- ◆ BARCELÒ J.A. 2009, *Computational Intelligence in Archaeology*, Hershey.
- ◆ BARCELÒ J.A. 2012, *Computer simulation in archaeology. Art, science or nightmare?*, *Virtual Archaeology Review*, 3(5), pp. 8–12.
- ◆ BARNAUD C., LE PAGE C., DUMRONGROJWATTHANA P., TRÉBUIL G. 2013, *Spatial representations are not neutral: Lessons from a participatory agent-based modelling process in a land-use conflict*, *Environmental Modelling & Software*, 45, pp. 150–159.
- ◆ BARONI C., ZANCHETTA G., FALICK A. E., LONGINELLI S. 2006, *Mollusc stable isotope record of a core from lake Frassino, northern Italy: hydrological and climatic changes during the last 14 ka*, in *The Holocene*, pp. 827-837.
- ◆ BATTY M. 2000, *Geocomputation using cellular automata*, in Openshaw S., Abrahart R.J. (eds.), *GeoCompuatation*, London, pp. 95-126.

- ◆ BELLINTANI G.F., PERETTO C., PERETTO R. 1968, *La stazione preistorica di Frattesina in Fratta Polesine – Rovigo. Notizie preliminari sul materiale raccolto in superficie*, Padusa, IV, pp. 2-3.
- ◆ BELLINTANI P. 1987, *I materiali dell'insediamento dell'età del Bronzo di Canàr (Castelnovo Bariano - Rovigo): le raccolte di superficie*, Padusa, XXIII, pp. 147-188.
- ◆ BELLINTANI P. 1990, *Frattesina, la scoperta e le ricerche*, in *Fratta Polesine. La storia*, Rovigo, pp. 20-35.
- ◆ BELLINTANI P. 1997, *Frattesina: l'ambra e la produzione vitrea nel contesto delle relazioni transalpine*, in ENDRIZZI L., MARZATICO F. (a cura di), *Ori delle Alpi*, Trento, pp. 116-129.
- ◆ BELLINTANI P. 2004, *Ambre del II millennio a.C. in Italia*, in GLEIRSCHER P., MARZATICO F. (a cura di), *Guerrieri, principi ed eroi fra il Danubio e il Po dalla preistoria all'alto Medioevo*, Trento, pp. 200-207.
- ◆ BELLINTANI P. 2010, *Ambra, una materia prima dal nord (ma non solo)*, in RADINA F., RECCHIA G. (a cura di), *Ambra per Agamennone. Indigeni e micenei tra Adriatico, Ionio ed Egeo nel II millennio a.C.*, Bari, pp. 141-146.
- ◆ BELLINTANI P., SALZANI L., DE ZUCCATO G., LEIS M., VACCARO C. 2015, *L'ambra dell'insediamento della tarda Età del bronzo di Campestrin di Grignano Polesine (Rovigo)*, in LEONARDI G., TINÉ V. (a cura di), *Preistoria e Protostoria del Veneto*, Studi di Preistoria e Protostoria – 2, Firenze, pp. 419-426.
- ◆ BELLUZZO G. 1980, *Una stazione dell'età del bronzo media e recente a Stanghelletti di Castagnaro (Verona)*, in FASANI L. (a cura di), *Il territorio veronese dalle origini all'età romana*, Verona, pp. 170-173.
- ◆ BELLUZZO G., SALZANI L. (a cura di) 1996, *Dalla terra al museo. Mostra di reperti preistorici e protostorici degli ultimi dieci anni di ricerca del territorio veronese*, Legnago.
- ◆ BELLUZZO G., SALZANI L. (a cura di) 1998, *Archeologia nella media pianura veronese*, Legnago.
- ◆ BELLUZZO G., TIRABASSI J. 1996, *Media e recente età del bronzo nella pianura veronese. Indagine cronologico-culturale paleoambientale e strutturale degli insediamenti*, in BELLUZZO G., SALZANI L. (a cura di), *Dalla terra al museo. Mostra di reperti preistorici e protostorici degli ultimi dieci anni di ricerca del territorio veronese*, Legnago, pp. 79-145.
- ◆ BERNABÒ BREA M., CARDARELLI A., CREMASCHI M. (a cura di) 1997, *Le terramare. La più antica civiltà padana*, Modena.
- ◆ BERNABÒ BREA M., CARDARELLI A., CREMASCHI M. 1997, *Il crollo del sistema terramaricolo*, in BERNABÒ BREA M., CARDARELLI A., CREMASCHI M. (a cura di) 1997, *Le terramare. La più antica civiltà padana*, Modena, pp. 745-753.
- ◆ BERNABÒ BREA M., CREMASCHI M. (a cura di) 2009, *Acque e Civiltà nelle terramare. La Vasca votiva di Noceto*, Milano.

- ◆ BERNABO' BREA M., CREMASCHI M. 1997, *La terramara di S. Rosa di Poviglio: le strutture*, in BERNABO' BREA M., CARDARELLI A., CREMASCHI M. (a cura di), *Le Terramare. La più antica civiltà padana*, Milano, pp. 196-212.
- ◆ BERTO F., CUPITO M., LEONARDI G., ROTTOLI M. 2015, *Le analisi archeobotaniche del “pozzetto” US 317 a Fondo Paviani (VR): alimentazione e strategie di sussistenza in un contesto della tarda Eta del Bronzo dell'Italia settentrionale*, *Preistoria del Cibo*. 50ma Riunione Scientifica dell'Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria, online in http://preistoriadelcibo.iipp.it/contributi/3_04.pdf (ultimo accesso: 16 febbraio 2022)
- ◆ BERTO F., ROTTOLI M. 2015, *Agricoltura e raccolta in un insediamento del Bronzo recente della pianura veronese. Il “pozzetto” US 317 di Fondo Paviani (Verona) – Scavi Università di Padova 2007-2012*, in LEONARDI G., TINÈ V. (a cura di), *Preistoria e Protostoria del Veneto*, Studi di Preistoria e Protostoria - 2, Firenze, pp. 829-832.
- ◆ BERTOLINI M., ZANINI S., THUN HOHENSTEIN U. 2015, *Nuovi dati sullo sfruttamento e gestione delle risorse animali tra il Bronzo antico ed il Bronzo recente nei territori del mediobasso Veronese e il basso Polesine*, in LEONARDI G., TINÈ V. (a cura di), *Preistoria e Protostoria del Veneto*, Studi di Preistoria e Protostoria – 2, pp. 321-326.
- ◆ BETTELLI M., CUPITÒ M., JONES R., LEONARDI G., LEVI S.T. 2017, *The Po Plain, Adriatic and Eastern Mediterranean in the Late Bronze Age: Fact, fancy and plausibility*, in FOTIADIS M., LAFFINEUR R., LOLOS Y., VLACHOPOULOS A. (Eds.), *Hesperos. Aegean Seen from the West*, Leuven-Liège, pp. 165–172.
- ◆ BETTELLI M., CUPITÒ M., LEVI S.T., JONES R., LEONARDI G. 2015, *Tempi e modi della connessione tra mondo egeo e area padano-veneta. Una riconsiderazione della problematica alla luce delle nuove ceramiche di tipo miceneo di Fondo Paviani (Legnago, Verona)*, in LEONARDI G., TINÈ V. (a cura di), *Preistoria e Protostoria del Veneto*, Studi di Preistoria e Protostoria – 2, Firenze, pp. 377–387.
- ◆ BETTELLI M., JONES R.E., LEVI S.T., VAGNETTI L. 2010, *Ceramiche egee e di tipo egeo lungo il versante adriatico pugliese: centri di produzione, livelli di circolazione, contesti d'uso*, in RADINA F. (a cura di) 2010, *Ambra per Agamennone: indigeni e micenei tra Adriatico, Ionio ed Egeo*; Bari, pp. 109-117.
- ◆ BETTO A. 2013, *Le “strade” dell'età del bronzo nelle Valli Grandi Veronesi Meridionali. Connettività e management idraulico nel quadro di un Paesaggio di Potere*, Tesi di dottorato, Università degli Studi di Padova, Rel. Prof. A. De Guio.
- ◆ BIANCHIN CITTON E. 1984, *Il Bronzo finale*, in ASPES A. (a cura di), *Il Veneto nell'antichità. Preistoria e Protostoria*, II, Verona, pp. 617-634.
- ◆ BIANCHIN CITTON E. 1986, *Rapporti tra Veneto ed Etruria nel Bronzo finale e agli inizi dell'età del Ferro*, in DE MARINIS R. (a cura di), *Gli Etruschi a nord del Po*, Mantova, pp. 40-51.
- ◆ BIANCHIN CITTON E. 2009, *Il Veneto tra Bronzo Recente e Bronzo Finale: popolamento e aspetti socio-economici di un'area di cerniera tra l'Adriatico e l'Oltralpe*, in BORGNA E., CÀSSOLA GUIDA P. (a cura di), *Dall'Egeo*

all'Adriatico: organizzazioni sociali, modi di scambio e interazione in età postpalaziale (XII-XI Sec. a.C.), pp. 257-271.

- ◆ BIANCHIN CITTON E. 2015, *Il Bronzo finale nel Veneto: dinamiche insediative e gestione del territorio*, in LEONARDI G., TINÉ V. (a cura di), *Preistoria e Protostoria del Veneto*, Studi di Preistoria e Protostoria - 2: Firenze, 2015, pp. 252-266.
- ◆ BIETTI SESTIERI A.M. 1996, *Protostoria. Teoria e pratica*, Roma.
- ◆ BIETTI-SESTIERI A.M. 2003, *L'Adriatico fra l'età del bronzo e gli inizi dell'età del ferro (ca 2200-900 a.C.)*, in LENZI F. (a cura di), *L'Archeologia dell'Adriatico dalla preistoria al Medioevo*, Atti del convegno internazionale (Ravenna 2001), Firenze, pp. 49-64.
- ◆ BIETTI-SESTIERI A.M. 2010, *Frattesina*, in RADINA F., RECCHIA G. (a cura di), *Ambra per Agamennone. Indigeni e micenei tra Adriatico, Ionio ed Egeo nel II millennio a.C.*, Bari, pp. 153-159.
- ◆ BITHELL M., BRASINGTON J., RICHARDS K. 2008, *Discrete-element, individual-based and agent-based models: tools for interdisciplinary enquiry in Geography?*, *Geoforum*, 39(2), pp. 625-642.
- ◆ BLANEY H.F., CRIDDLE W.D. 1950, *Determining water requirement in irrigated areas from climatological data*, Soil Conservation Service Technical Publication, 96, p. 48.
- ◆ BOND G., KROMER B., BEER J., MUSCHELER R., EVANS M., SHOWERS W., HOFFMAN S., LOTTI-BOND R., HAJADAS I., BONANI G. 2001, *Persistent solar influence on North Atlantic Climate During the Holocene*, *Nature*, 2001, pp. 2130-2136.
- ◆ BONDESAN M. 1990, *L'area deltizia padana: caratteri geografici e geomorfologici*, in BONDESAN M. (a cura di), *Il Parco del delta del Po. Studi ed immagini*, Ferrara, pp. 9-48.
- ◆ BONFANTI F. 2015, *Le indagini archeologiche nella pianura veronese del Novecento: il contributo di Maria Fioroni*, Legnago.
- ◆ BOOGARD A. 2004, *Neolithic Farming in Central Europe: an archaeobotanical study of crop husbandry practices*, Routledge.
- ◆ BOGAARD A., 2005, "Garden agriculture" and the nature of early farming in Europe and the Near East, *World Archaeology*, 37(2), pp.177-196.
- ◆ BORGNA E. 2013, *Di periferia in periferia. Italia, Egeo e Mediterraneo orientale ai tempi della koinè metallurgica: una proposta di lettura diacronica*, *Rivista di Scienze Preistoriche*, LXIII, pp. 125-153.
- ◆ BORGNA E., 2014 *Metallurgical Production and Long-Distance Interaction. New evidence from LM III Phaistos*, *Creta Antica*, 12, pp. 289-306.
- ◆ BORGNA E., CÀSSOLA GUIDA P. (a cura di) 2009, *Dall'Egeo All'Adriatico: Organizzazioni Sociali, Modi Di Scambio e Interazione in Età Postpalaziale (XII-XI Sec. a.C.)*, Atti Del Seminario Internazionale *From the Aegean to the Adriatic: Social Organizations, Modes of Exchange and Interaction in Postpalatial Times (12th-11th*

B.C.) Udine, 1-2 Dicembre 2006, Studi e Ricerche Di Protostoria Mediterranea – 8, Roma.

- BORN C., DEUTSCHMANN R. 1997, *Measurement of Fast Rotation by VLSI Circuits*, in PAULUS E., FRIEDRICH M.W. (eds.), *Mustererkennung 1997*, Braunschweig, pp. 517-524.
- ♦ BOSERUP E. 1965, *The Conditions of Agricultural Growth: the economics of agrarian change under population pressure*, London.
- ♦ BOVOLATO C. 2011-2012, *Relazioni e dinamiche formative tra record archeologico di superficie e sepolto nelle Valli Grandi Veronesi*, Tesi di Laurea Specialistica, relatore prof. A. De Guio, correlatore dott. C. Balista, Dipartimento di Archeologia, Università degli Studi di Padova, A.A. 2011-2012.
- ♦ BOX P. 2002, *Spatial Units as Agents: Making the Landscape an Equal Player in Agent-Based Simulations*, in GIMBLETT (ed), *Integrating geographic information systems and agent-based modeling techniques for simulating social and ecological processes*, Oxford, pp. 59-82.
- ♦ BRATMAN M. E., ISRAEL D. J., POLLACK M. E., *Plans and resource-bounded practical reasoning*, Computational Intelligence, 4, pp. 349–355.
- ♦ BRIGGS D., WESTERVELT J., LEVI S., HARPER S. 1996, *A Desert Tortoise Spatially Explicit Population Model. Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling* (Santa Fe, NM, January 21-26, 1996), Santa Barbara.
- ♦ BROODBANK C. 2015, *The making of the middle sea: a history of the Mediterranean from the beginning to the emergence of the classical world*, London.
- ♦ BROWN D.G., PAGE S.E., RIOLO R., ZELLNER M., RAND W. 2005, *Path dependence and the validation of agent-based spatial models of land use*, International Journal of Geographical Information Science, 19(2), pp. 153–174.
- ♦ BURIGANA L. 2014-2015, *Progetto AMPBV: elaborazione e analisi dei dati lidar e radar della Bassa Veronese*, tesi di Laurea Magistrale in Scienze Archeologiche, Università degli Studi di Padova, relatore prof. A. De Guio.
- ♦ BURIGANA L., MAGNINI L. 2017, *Image Processing and Analysis of Radar and Lidar Data: New Discoveries in Verona Southern Lowland (Italy)*, STAR: Science & Technology of Archaeological Research 3 (2), Routledge: pp. 490–509.
- ♦ CAILLOU P., GAUDOU B., GRIGNARD A., TRUONG C.Q., TAILLANDIER P., 2015, *A Simple-to-use BDI architecture for Agent-based Modeling and Simulation*, in *The Eleventh Conference of the European Social Simulation Association (ESSA 2015)* Sep 2015, Groningen, Netherlands.
- ♦ CALZOLARI M. 1991, *Alla ricerca del paesaggio antico: le divisioni agrarie di età romana nelle Valli Grandi Veronesi*, in CHIAPPA B., SANDRINI A. (a cura di), *Cerea: storia di una Comunità attraverso i secoli*, Verona, pp. 31-40.

- ◆ CALZOLARI M. 1993, *Ricerche topografico-archeologiche sulla centuriazione tra il Bastione S.Michele e il Naviglio Bussè (Valli Grandi Veronesi)*, Annali Benacensi, 10, pp. 23-41.
- ◆ CALZOLARI M. 2001, *Le Valli di Castagnaro in età romana. Contributo alla carta archeologica del Basso Veronese*, Journal of Ancient Topography, XI, 2001, pp. 173-222.
- ◆ CANCI A. 2007, *L'inumato con spada della tomba 410 di Olmo di Nogara: note paleopatologiche*, Bollettino del Museo Civico di Storia Naturale di Verona, 31, pp. 63-67.
- ◆ CANCI A. 2015, *Lesioni da freccia nella necropoli dell'Età del bronzo di Olmo di Nogara (Verona)*, in LEONARDI G., TINÉ V. (a cura di), *Preistoria e Protostoria del Veneto*, Studi di Preistoria e Protostoria - 2: Firenze, pp. 759-763.
- ◆ CANCI A., GASPARI E., MAINO C. 2009, *Cutmarks da lama metallica sui resti scheletrici degli armati della necropoli del Bronzo medio e recente di Olmo di Nogara (Verona). Traumi inflitti, trapanazioni terapeutiche e lesioni postdeposizionali*, Bollettino del Museo Civico di Storia Naturale di Verona, 33, pp. 133-148.
- ◆ CANTELE G. 1991-92, *Impatto agrario e archeologia di superficie*, tesi di Laurea, Università di Padova- Dipartimento di Scienze dell'Antichità, relatore prof. A. De Guio.
- ◆ CANTELE G., DE GUIO A., PERIN L., MAGRO S., MALGARISE A. 1992, *Risorse culturali "emergenti": modelli di prospezione, valutazione e valorizzazione*, in CÀSSOLA GUIDA P., ROSADA G. (a cura di), *Tipologia di insediamento e distribuzione antropica nell'area Veneto-Istria dalla Protostoria all'Alto Medioevo*, Venezia, pp. 125-134.
- ◆ CARDARELLI A. (a cura di) 2014, *La necropoli della terramara di Casinalbo*, Grandi contesti e problemi della protostoria italiana, 15, Borgo San Lorenzo (FI).
- ◆ CARDARELLI A. 1997, *Terramare: l'organizzazione sociale e politica delle comunità*, in BERNABO' BREA M., CARDARELLI A., CREMASCHI M. (a cura di), *Le Terramare. La più antica civiltà padana*, Milano, pp. 653-660.
- ◆ CARDARELLI A. 2009, *Insedimenti dell'età del bronzo fra Secchia e Reno. Formazione, affermazione e collasso delle terramare*, in CARDARELLI A., MALNATI L. (a cura di), *Atlante dei Beni Archeologici della Provincia di Modena*, vol. III, tomi 1-2. Collina e Alta pianura, Firenze, pp. 33-65.
- ◆ CARDARELLI A. 2010, *The collapse of the Terramare Culture and growth of new economic and social systems during the Late Bronze Age in Italy*, Scienze dell'Antichità, Storia Archeologia Antropologia, 15, pp. 449-520.
- ◆ CARNEY M., DAVIES B. 2020, *Agent-Based Modeling, Scientific Reproducibility, and Taphonomy: A Successful Model Implementation Case Study*. Journal of Computer Applications in Archaeology, 3(1), pp.182–196.
- ◆ CARRA M. 2012, *Per una storia della cerealicoltura in Italia settentrionale dal Neolitico all'Età del Ferro: strategie adattive e condizionamenti ambientali*,

[Dissertation thesis], Alma Mater Studiorum Università di Bologna. Dottorato di ricerca in Archeologia.

- ◆ CARRA M., CATTANI M., DEBANDI F. 2012, *Coltivazioni sperimentali per una valutazione della produttività agricola dell'Età del Bronzo nell'area padana*, IpoTESI di Preistoria, 5(1), pp. 79–100.
- ◆ CÀSSOLA GUIDA P., *Indizi di presenze egeo-orientali nell'alto Adriatico alla fine dell'Età del Bronzo*, in LA ROSA V., PALERMO D., VAGNETTI L. (a cura di), *επί πόντον πλαζόμενοι, Simposio Italiano di Studi Egei dedicato a L. Bernabò Brea e G. Pugliese Carratelli* (Roma, 18-20 febbraio 1998), Roma, pp. 487-497.
- ◆ CASTIGLIONI E., PIZZI C., ROTTOLI M., BERNABO BREA M. 2009, *Gli attrezzi lignei e in fibra vegetale*, in BERNABO BREA M., CREMASCHI M. (a cura di), *Acqua e civiltà nelle terramare. La vasca votiva di Noceto*, Milano, pp. 225-234.
- ◆ CASTIGLIONI G.B. 2004, *Quaternary glaciations in the eastern sector of the Italian Alps*, in GIBBARD P., EHLERS J. (eds.), *Developments in Quaternary Science*, vol. 2, part 1, pp. 209-214.
- ◆ CATTANI M. 2008, *La Media età del Bronzo nell'area tra Panaro e Reno (province di Modena e Bologna), Progetto per una ricostruzione del paesaggio*, IpoTesi di Preistoria, 1, pp. 211-250.
- ◆ CATTANI M. 2009, *L'ansa cilindro-retta come indicatore delle interazioni culturali nel Bronzo recente*, IpoTESI di Preistoria 1, pp. 250-254.
- ◆ CATTANI M., DEBANDI F., CARRA M. 2021, *La sussistenza nell'età del Bronzo in Italia settentrionale. Archeologia sperimentale e analisi dei contesti di abitato come casi studio per un calcolo demografico*, in *Preistoria del cibo L'alimentazione nella preistoria e nella protostoria* (Roma, 5-9 ottobre 2015), Firenze, pp. 213-222.
- ◆ CATTANI M., MARCHESINI M. 2010, *Economia e gestione del territorio nell'età del Bronzo: le radici della civiltà contadina*, in CATTANI M., MARCHESINI M., MARVELLI S. (a cura di), *Paesaggio ed economia nell'età del Bronzo. La pianura bolognese tra Samoggia e Panaro*, San Giovanni in Persiceto, pp. 232-243.
- ◆ CAV 1990, *Carta Archeologica del Veneto*, II, Modena.
- ◆ CAVAZZUTI C. 2014, *I resti umani cremati dalla necropoli di Casinalbo*, in CARDARELLI A. (a cura di), *La Necropoli della Terramara di Casinalbo*, Firenze, pp. 678-715.
- ◆ CHAMBERLAIN A. 2006, *Demography in Archaeology*, New York.
- ◆ CIMA P. 2012, *Fossil landscapes: alcune linee sperimentali di remote sensing e simulazione nel progetto AMPBV (Alto-medio Polesine - Bassa veronese)*, in BROGIOLO G.P., ANGELUCCI D.E., COLECCHIA A., REMONDINO F. (a cura di), *APSAT 1. Teoria e metodi della ricerca sui paesaggi d'altura*, Padova, pp. 117-131.
- ◆ CIOFFI REVILLA C. 2010, *Computational Social Science*, WILEY Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 2(3), pp. 259–271.
- ◆ CLARKE D.L. (ed.) 1972, *Models in Archaeology*, London.

- ◆ CLARKE K.C. 2014, *Cellular Automata and Agent-Based Models*, in FISCHER M.M., NIJKAMP P. (eds.), *Handbook of Regional Science*, Berlin, pp. 1217–1233.
- ◆ CLIFFORD N.J. 2008, *Models in geography revisited*, *Geoforum* 39(2), pp. 675–686.
- ◆ COCCHI GENICK D. 2004, *Le ceramiche nel ruolo di indicatori cronologici e regionali*, in COCCHI GENICK D. (a cura di) *L'età del Bronzo Recente in Italia*, Firenze-Lucca, pp. 22-52.
- ◆ COLONNA S., FOLCO G., MARANGONI F. 2013, *I cibi della salute. Le basi chimiche di una corretta alimentazione*, Milano.
- ◆ COOKE K.L. 1979, *Mathematical approaches to culture change*, in RENFREW C., COOKE K.L. (eds.), *Transformations: Mathematical Approaches to Culture Change*, New York, pp. 45–79.
- ◆ CORRÒ E., VINCI G. (eds.) 2021, *Palinsesti Programmati Nell'Alto Adriatico? Decifrare, Conservare, Pianificare e Comunicare Il Paesaggio: Atti Della Giornata Di Studi (Venezia, 18 Aprile 2019)*, Venezia.
- ◆ COSTOPOULOS A. 2009, *Simulating society*, in MASCHNER H., BENTLEY R.A. e CHIPPINDALE C. (eds.), *Handbook of Archaeological Theories*, Lanham, pp. 273–281.
- ◆ COALE, A.J., DEMENY P. 1966, *Regional Model Life Tables and State Populations*, Princeton.
- ◆ COSTOPOULOS A. 2010, *For a theory of archaeological simulation*, in COSTOPOULOS A., LAKE M. (eds.), *Simulating Change: Archaeology into the Twenty-First Century*, Salt Lake City, pp. 21–27.
- ◆ COSTOPOULOS A., LAKE, M.W. (eds.) 2010, *Simulating Change: Archaeology Into the Twenty-First Century*, Salt Lake City.
- ◆ COULBORN R. 1954, *The Rise and Fall of Civilizations*, *Ethics* 64: pp. 205-216.
- ◆ COX D.R., OAKES D. 1984, *Analysis of Survival Data (1st ed.)*, London.
- ◆ CREMASCHI M. 1991-1992, *Economia ed uso del territorio: possibile crisi ambientale durante il Bronzo Recente*, in Atti del Convegno *L'età del Bronzo in Italia nei sec. dal XVI al XIV a.C.*, (Lido di Camaiore 26-30 ottobre 1989), *Rassegna di Archeologia* 10, 1991-1992, pp. 180-182.
- ◆ CREMASCHI M. 2009a, *Ambiente, clima ed uso del suolo nella crisi della cultura delle terramare*, in CAZZELLA A., CARDARELLI A., FRANGIPANE M., PERONI R. (a cura di), *Le Ragioni del Cambiamento*, Atti del Convegno Internazionale (Roma 2006), *Scienze dell'Antichità*, 15, pp. 521-534
- ◆ CREMASCHI M. 2009b, *Foreste, terre coltivate ed acque. L'originalità del progetto terramaricolo*, in BERNABO BREA M., CREMASCHI M. (a cura di), *Acqua e civiltà nelle Terramare. La vasca votiva di Noceto*, Milano, pp. 34-45.
- ◆ CREMASCHI M. 2017, *Acque, campi e boschi nella civiltà delle terramare. Le ragioni di un collasso di civiltà nella Pianura Padana dell'età del bronzo*, Milano.

- ◆ CREMASCHI M., MUTTI A., BARATTI G., BORGI F., BRANDOLINI F., DONATI N., FERRARI P., FRONZA G., LACHENAL T., ZERBONI A. 2016, *La terramara Santa Rosa di Poviglio: strutture tra Villaggio Piccolo e Villaggio Grande. Nuovi dati dallo scavo 2015*, The Journal of FASTI ON LINE, 349.
- ◆ CREMASCHI M., PIZZI C. 2006, *I pozzi perimetrali del Villaggio Grande di Santa Rosa di Poviglio (RE). Uso delle risorse idriche tra la fine del Bronzo Medio e il Bronzo Recente*, in AA. VV. (a cura di), *Studi di Protostoria in onore di Renato Peroni*, Insegna del Giglio, Firenze 2006, pp. 50-61.
- ◆ CREMASCHI M., PIZZI C., VALSECCHI V. 2007, *Gestion des eaux dans les terramares et un possible changement environmental pendant la tarde age du Bronze de l'Italie du Nord. Le cas de la terramara de Santa Rosa (RE, Italie)*, in XXX Atti 129e Congrès national des Sociétés historiques et scientifiques, Besançon.
- ◆ CROOKS, A.T., CASTLE, C.J.E., BATTY, M., 2008, *Key challenges in agent-based modelling for geo-spatial simulation*, Computers, Environment and Urban Systems, 32 (6), pp. 417–430.
- ◆ CUPITÒ M. 2010, *Il sito arginato di Fondo Paviani-Legnago. Notizia preliminare sulla campagna di indagini 2009 e primo bilancio delle ricerche*, Quaderni di Archeologia del Veneto, XXVI, pp. 82-86.
- ◆ CUPITÒ M. 2011, *Micenei in Italia settentrionale*, in MARZATICO F., GEBHARD R., GLEIRSCHER P. (eds.), *Le Grandi Vie Delle Civiltà. Relazioni e Scambi Fra Mediterraneo e il Centro Europa Dalla Preistoria Alla Romanità*, Milano, pp. 193–197.
- ◆ CUPITÒ M., LEONARDI G. 2005, *Proposta di lettura sociale della Necropoli di Olmo di Nogara*, in SALZANI L. (a cura di) 2005, *La necropoli dell'età del bronzo all'Olmo di Nogara*, pp. 488-494.
- ◆ CUPITÒ M., LEONARDI G. 2010, *Fondo Paviani*, in RADINA F., RECCHIA G. (a cura di), *Ambra per Agamennone. Indigeni e micenei tra Adriatico, Ionio ed Egeo nel II millennio a.C.*, Bari, pp. 160-163.
- ◆ CUPITÒ M., LEONARDI G., DALLA LONGA E., NICOSIA C., BALISTA C., DAL CORSO M., KIRLEIS W. 2015, *Fondo Paviani (Legnago, Verona): Il central place della polity delle Valli Grandi Veronesi nella tarda Età del bronzo. Cronologia, aspetti culturali, evoluzione delle strutture e trasformazioni paleoambientali*, in LEONARDI G., TINÉ V. (a cura di), *Preistoria e Protostoria del Veneto*, Studi di Preistoria e Protostoria - 2, Firenze, pp. 357–375.
- ◆ CUPITÒ M., LEONARDI G., NICOSIA C., DALLA LONGA E. 2014, *Legnago, Fondo Paviani. Il sito arginato dell'età del Bronzo. Campagna di indagini 2012*, Notizie di Archeologia del Veneto, 1, pp. 99-102.
- ◆ CURET L.A. 1998, *New Formulae for estimating prehistoric populations for lowland South America and the Caribbean*, Antiquity, 72, pp. 359-375.
- ◆ DAL CORSO M., MARCHESINI M., LEONARDI G., KIRLEIS W. 2012, *Environmental Changes and Human Impact during the Bronze Age in Northern Italy: On-site Palynological Investigation at Fondo Paviani, Verona*, in KNEISEL J.,

KIRLEIS W., DAL CORSO M., TAYLOR N., TIEDTKE V. (a cura di), *Collapse or Continuity? Environment and Development of Bronze Age Human Landscapes, in Socio-Environmental Dynamics over the last 12,000 Years: The Creation of Landscapes II*, Proceedings of the International Workshop (14-18 March 2011), Bonn, pp. 71- 83.

- ◆ DALLA LONGA E., 2015, *La media e bassa pianura veneta a sud dell'antico Adige nell'età del bronzo. Popolamento ed evoluzione socio-politica di un territorio a cavallo tra Europa, Italia e Mediterraneo*, Tesi di dottorato, Università degli Studi di Padova, rel. Prof. M. Cupitò.
- ◆ DANCKERS J. 2015, *Explaining the emergence of the terramare: a colonisation of the Central Po Plain or an extensification of Bronze Age agriculture?*, Central Mediterranean Prehistory (2015/05/20 - 2015/05/20, UCL), London.
- ◆ DAVID-ELBIALI M. 2000, *La Suisse occidentale au II^{ème} millénaire av. J.C.: chronologie, culture et intégration européenne*, Cahiers d'archéologie romande, 80, Lausanne.
- ◆ DE BON A. 1941, *Storia e leggende della terra veneta – I. Le strade del diavolo*, Schio.
- ◆ DE GROSSI MAZZORIN J., RIEDEL A. 1997, *La fauna delle terramare*, in BERNABÒ BREA M., CARDARELLI A., CREMASCHI M. (a cura di) 1997, *Le Terramare. La più antica civiltà padana*, Milano, pp. 475-480.
- ◆ DE GUIO A. (a cura di) 2009, *Tele-Frattesina: alla ricerca della firma spettrale della complessità*, Padusa, XLIV, pp. 133-167.
- ◆ DE GUIO A. 1985, *Archeologia di superficie ed archeologia superficiale*, Quaderni di Archeologia del Veneto, I, pp. 176-184.
- ◆ DE GUIO A. 1989, *Analisi strutturale ed archeologia di superficie*, in Giannitrapani E., Simone L., Tinè S. (a cura di), *Interpretazione funzionale dei "fondi di capanna" di età preistorica*, Milano: pp. 25-30.
- ◆ DE GUIO A. 1990, *Ecologia culturale e archeologia spaziale: teoria, catastrofi, teoria delle catastrofi e considerazioni varie al margine di un'esperienza scientifica in corso*, in *Archeologia stratigrafica in Italia settentrionale* (27 ottobre 1984, Como), Villabartolomea, pp. 1-10.
- ◆ DE GUIO A. 1995a, *Alto-Medio Polesine - Basso Veronese: from a "landscape archaeology " to an "archaeology of the mind"*, in CHRISTIE N., *Settlement and economy in Italy 1500 bC to AD 1500*, Papers of the Fifth Conference on Italian archaeology, Oxford, pp. 13-24.
- ◆ DE GUIO A. 1995b, *Surface and subsurface: deep ploughing into complexity*, in HENSEL W., TABACZYNSKI S., URBANCZYK P. (a cura di), *Theory and practice of archaeological research, vol. II*, Warszawa: Institute of Archaeology and Ethnology, Committee of Pre- and Protohistoric Sciences, pp. 329-414.
- ◆ DE GUIO A. 1997, *Alla periferia del mondo terramaricolo: «archeologia della complessità» nelle Valli Grandi Veronesi*, in BERNABÒ BREA M., CARDARELLI

A., CREMASCHI M. (a cura di) 1997, *Le Terramare. La più antica civiltà padana*, Milano, pp. 147-165.

- ◆ DE GUIO A. c.s., *Frogs and grogs around the pond... Dalle Valli Grandi a Frattesina*, Padusa, LVII
- ◆ DE GUIO A. 2013, *Radar imaging and Geobia approaches in Remotely Sensed landscape*, in *Detecting and interpreting Landscape transformations*, University of Padua, International Summer School, Archaeology (Padova 23-28 settembre 2013).
- ◆ DE GUIO A., BALISTA C., VANZETTI A., WILKINS J., WHITEHOUSE R.D., NICOSIA C. c.s., *Il progetto AMPBV: la periferia delle terramare*, relazione presentata al Workshop *Le Periferie delle Terremare. Campi, Apparati Idraulici, Necropoli e Strutture Produttive*, Poviglio-PR 31 Agosto-1 Settembre 2006.
- ◆ DE GUIO A., BETTO A. 2005, *Palimpsestic fossil landscapes: a flight through an analytical frontier*, in FORTE M.(ed.), *Archaeological Landscapes through Digital Technologies*, Proceedings of the 2nd Italy-United States Workshop, Rome (November 3-5, 2003), Oxford.
- ◆ DE GUIO A., BETTO A., BALISTA C. 2011, *Per la tutela e la valorizzazione di un patrimonio paesaggistico-culturale unico nel suo genere: le tracce degli antichi campi, dei canali e delle strade su terrapieno di età preistorica e romana conservate nel sottosuolo delle Valli Grandi e Medio Veronese*, in SARACINO M. (a cura di), *Pianificazione territoriale, urbanistica e archeologia: una sintesi possibile*, Verona: pp. 79-124.
- ◆ DE GUIO A., WHITEHOUSE R.D., WILKINS J. (a cura di) 1989, *Progetto Alto-Medio Polesine: terzo rapporto*, Quaderni di Archeologia del Veneto, V, pp. 181-216.
- ◆ DE GUIO A., WHITEHOUSE R.D., WILKINS J. (a cura di) 1990, *Progetto Alto-Medio Polesine: quarto rapporto*, Quaderni di Archeologia del Veneto, VI, pp. 217-238.
- ◆ DE GUIO A., WHITEHOUSE R.D., WILKINS J. (a cura di) 1992, *Progetto Alto-Medio Polesine: quinto rapporto*, Quaderni di Archeologia del Veneto VIII, pp. 173-190.
- ◆ DE GUIO A., WHITEHOUSE R.D., WILKINS J. (a cura di) 1993, *Progetto Alto-Medio Polesine: sesto rapporto*, Quaderni di Archeologia del Veneto, IX, pp. 170-186.
- ◆ DE GUIO A., WHITEHOUSE R.D., WILKINS J. (a cura di) 1995c, *Progetto Alto-Medio Polesine: ottavo rapporto*, Quaderni di Archeologia del Veneto, XI, pp. 166-178.
- ◆ DE GUIO A., WHITEHOUSE R.D., WILKINS J. (a cura di) 1999, *Progetto Alto-Medio Polesine-Basso Veronese: decimo rapporto*, Quaderni di Archeologia del Veneto, pp. 101-116.
- ◆ DE GUIO A., WHITEHOUSE R.D., WILKINS J. (a cura di) 2001-2003(2004), *Alto-Medio Polesine Project: ninth report*, Accordia Research Papers, 8, pp. 149-164.
- ◆ DE MARINIS R. 1975, *L'età del Bronzo*, in CREMASCHI M. (a cura di), *Preistoria e Protostoria nel Reggiano. Ricerche e scavi 1940-1975*, Reggio Emilia, pp. 31-55.

- ◆ DE MARINIS R.C. 1997, *L'età del Bronzo nella regione benacense e nella pianura padana a nord del Po*, in BERNABO' BREA M., CARDARELLI A., CREMASCHI M. (a cura di), *Le Terramare. La più antica civiltà padana*, Milano, pp. 405-422.
- ◆ DE MARINIS R.C. 1999, *Towards a Relative and Absolute Chronology of the Bronze Age in Northern Italy*, *Notizie Archeologiche Bergomensi*, 7, pp. 23-100.
- ◆ DE MARINIS R.C. 2002, *Il significato delle ricerche archeologiche al Lavagnone*, in DE MARINIS (a cura di), *Studi sul Lavagnone*, *Notizie Archeologiche Bergomensi*, 10, pp. 1-19.
- ◆ DE MARINIS R.C. 2010, *Continuity and discontinuity in Northern Italy from the Recent to the Final Bronze Age: a view from North-Western Italy*, *Scienze dell'Antichità. Storia Archeologia Antropologia*, 15, pp. 535-545.
- ◆ DE MARTINO F. 1979, *Produzione di cereali in Roma nell'età arcaica*, *Parola del passato*, CLXXXVII, pp. 241-255.
- ◆ DE MARTINO F. 1984, *Ancora sulla produzione di cereali in Roma arcaica*, *Parola del passato*, CCXVII, pp. 241-263.
- ◆ DEAN J.S., GUMERMAN G.J., EPSTEIN J.M., AXTELL R.L., SWEDLUND A.C., PARKER M.T., MCCARROLL S. 1998, *Understanding Anasazi Culture Change Through Agent Based Modeling*, Working Paper (98-10-094, Santa Fe Institute), in KOHLER T.A., GUMERMAN G.J. (eds.) 2000, *Dynamics in Human and Primate Societies: Agent Based Modeling of Social and Spatial Processes*, New York-London.
- ◆ DEBANDI F.I. 2021, *Sistemi Di Gestione Economica e Alimentazione Nelle Comunità Dell'età Del Bronzo Con Particolare Riferimento All'Italia Settentrionale*, Bologna.
- ◆ DEIANA R., VICENZUTTO D., DEIDDA G.P., BOAGA J., CUPITÒ M. 2020, *Remote Sensing, Archaeological, and Geophysical Data to Study the Terramare Settlements: The Case Study of Fondo Paviani (Northern Italy)*, *Remote Sensing* 12 (16), p. 2617.
- ◆ DI RENZONI A. 2006, *L'evoluzione del sistema insediativo delle terramare: alcuni casi studio*, in AA.VV., *Studi di protostoria in onore di Renato Peroni*, Borgo S. Lorenzo (FI), pp. 471-484.
- ◆ DIAMOND J.M. 2002, *Archaeology: Life with the artificial Anasazi*, *Nature*, 419, pp. 567-569.
- ◆ DIAMOND J.M. 2005, *Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed*, New York.
- ◆ DIJKSTRA E.W. 1959, *A note on two problems in connexion with graphs*, *Numerische Mathematik*, 1, pp. 269-271.
- ◆ DORAN J. 1999, *Prospects for Agent-Based Modelling in Archaeology*, *Archaeologia e Calcolatori*, 10, 1999, pp. 33-44.
- ◆ DROGOUL A., FERBER J. 1999, *Multi-agent simulation as a tool for studying emergent processes in societies*, in GILBERT N., DORAN J. (eds.), *Simulating Societies: The Computer Simulation of Social Phenomena*, London, pp. 127-142.

- ◆ DURANTE PASA M.V., FASANI L., PASA A. 1969, *La stazione preistorica di Tombola di Cerea (Verona)*, in *Scritti sul Quaternario in onore di Angelo Pasa*, Verona, pp. 149-178.
- ◆ EARLE T., JOHNSON A. 1987, *The Evolution of Human Societies: From Foraging Group to Agrarian State*, Stanford University.
- ◆ EARLE T., KOLB M.J. 2010, *Regional Settlements Patterns*, in EARLE T, KRISTIANSEN K. (a cura di), *Organizing Bronze Age Societies*, Cambridge, pp. 57-86.
- ◆ EDMONDS B., MOSS S. 2011, *Simulating Social Complexity: A Handbook*, Berlin.
- ◆ EDMONDS B., MEYER R., 2017, *Simulating Social Complexity: A Handbook*, New York.
- ◆ EPSTEIN J.M. 2006, *Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling*, Princeton.
- ◆ EPSTEIN J.M. 2008, *Why Model?*, Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 11 (4), p.12.
- ◆ EPSTEIN J.M. 2013, *Agent Zero: Toward Neurocognitive Foundations for Generative Social Science*, Princeton.
- ◆ EPSTEIN J.M., AXTELL R.L. 1996, *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*, Cambridge, MA.
- ◆ FACCHI A. 2005, *Pietro Paolo Martinati e le prime ricerche di paleontologia nella pianura veronese*, in LEONARDI G., ROSSI S. (a cura di), *Archeologia e idrografia del Veronese a cent'anni dalla deviazione del fiume Guà (1904-2004)*, Saltuarie dal Laboratorio del Piovego, 6, pp. 105-133
- ◆ FAO 1998, *Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements*, FAO Irrigation and Drainage Paper 56.
- ◆ FAO 2004, *Human energy requirements. Report of a joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation. Rome, 17-24 October 2001*, FAO, Rome. Online at: <http://www.fao.org/docrep/007/y5686e/y5686e00.HTM> (last access: january 2022).
- ◆ FASANI L. 1977, *Corte Vivaro (Nogarole Rocca – Verona)*, Bollettino del Museo Civico di Storia Naturale di Verona, IV, pp. 634-635.
- ◆ FASANI L., SALZANI L. 1975, *Nuovo insediamento dell'età del bronzo in località "Fondo Paviani" presso Legnago (VR)*, Bollettino del Museo Civico di Storia Naturale di Verona, II, pp. 259-281.
- ◆ FERRARESE A. (a cura di) 2008, *Maria Fioroni - Leniacensia - Scritti 1950-1970*, Legnago.
- ◆ FETTER C.W. 2018, *Applied Hydrogeology*, Upper Saddle River, N.J.
- ◆ FILATOVA T., 2015, *Empirical Agent-Based Land Market: Integrating Adaptive Economic Behavior in Urban Land-Use Models*, Computers, Environment and Urban Systems, 54, p.397–413.

- ◆ FILATOVA T., VERBURG P.H., PARKER D.C., STANNARD C.A. 2013, *Spatial agent-based models for socio-ecological systems: Challenges and prospects*, Environmental Modelling & Software, 45, pp. 1–7.
- ◆ FIORENTINO G., CASTIGLIONI E., ROTTOLI M., NISBET R. 2004, *Le colture agricole in Italia nel corso dell'età del Bronzo: sintesi dei dati e linee di tendenza*, in D. COCCHI GENICK (ed.), *L'età del Bronzo Recente in Italia*, Atti del Congresso Nazionale (Lido di Camaiore, 26-29 ottobre 2000), Viareggio, pp. 219-226.
- ◆ FIORI R. (a cura di) 2000, *La topografia dell'antica Italia settentrionale da Alessio De Bon ad oggi – Metodi e scoperte*, Atti del Convegno di Studi (17 ottobre 1998, Calalzo di Cadore), Calalzo.
- ◆ FIORONI M. 1967-1968, *Ricerche e ritrovamenti nelle valli veronesi*, Atti e Memorie della Accademia di Agricoltura Scienze e Lettere di Verona, CXLIV, pp. 147-156.
- ◆ FISHER D.A., KOEMER R.M. 2003, *Holocene ice core climate history: a multi-variable approach*, in MACKAY A.W., BATTERBEE R.W., BIRKS H.J.B., OLDFIELD F. (eds), *Global Change in the Holocene: approaches to reconstructing fine-resolution climate change*, London, pp. 228-232.
- ◆ FLANNERY K.V. 1972, *The Cultural Evolution of Civilizations*, Annual Review of Ecology and Systematics, 3, pp. 399-426.
- ◆ FLEMING T.R., HARRINGTON D.P. 1991, *Counting processes and survival analysis*, New York.
- ◆ FLORENZANO A., MONTECCHI M.C., RINALDI R. (a cura di) 2018, *Humans and environmental sustainability. Lessons from the past ecosystems of europe and northern Africa*, 14th Conference of Environmental Archaeology (26-28 febb.2018), Modena.
- ◆ FONTANA A., MOZZI P., BONDESAN A. 2004, *L'evoluzione geomorfologica della pianura veneto-friulana*, in BONDESAN A., MENEGHEL M. (a cura di), *Geomorfologia della provincia di Venezia*, Padova, pp. 113-136.
- ◆ FONTANA A., MOZZI P., BONDESAN A. 2008, *Alluvial megafans in the Venetian–Friulian Plain (north-eastern Italy): evidence of sedimentary and erosive phases during Late Pleistocene and Holocene*, Quaternary International, 189, pp. 71-90.
- ◆ FORDHAM D. A., SALTRÉ F., HAYTHORNE S., WIGLEY T.M., OTTO-BLIESNER B. L., CHAN K.C., BROOK B.W. 2017, *PaleoView: a tool for generating continuous climate projections spanning the last 21 000 years at regional and global scales*, Ecography, 40, pp. 1348-1358.
- ◆ FORESMAN T.W. (ed.) 1998, *The History of Geographic Information Systems: Perspectives from the Pioneers*, Prentice Hall Series in Geographic Information Science, Upper Saddle River.
- ◆ FORNI G. 1981, *Dalla ignicoltura cerealicola del prossimo Oriente alla genesi dell'aratrocoltura in Italia. Suo significato, struttura, conseguenze culturali*, Rivista di storia dell'Agricoltura, XXI(1), pp. 183-236.

- ◆ FORNI G. 2002, *La produttività*, in FORNI G., MARCONE A. (a cura di), *Storia dell'Agricoltura Italiana*, vol.I - *L'Età Antica*, 1 *La preistoria*, 2 *Italia Romana*, Firenze, pp. 431-446.
- ◆ FORNI G. 2011, *Fuoco e agricoltura dalla preistoria ad oggi. Storia e antropologia di un plurimillenario strumento coltivatorio*, *Rivista di storia dell'agricoltura*, LI, pp. 3-54.
- ◆ FORTUNATI M., POLLO R. (a cura di) 2010, *Cerea 3500 anni fa. La città dei vivi e la città dei morti*, Catalogo della mostra, Legnago.
- ◆ FRONTINI P. 2011, *Aspetti Della Fine Della Cultura Palafitticolo-Terramaricola*, *IpoTesi Di Preistoria*, 4(1), pp. 1-203.
- ◆ GABBRIELLINI S. 2011, *Simulare meccanismi sociali con NetLogo: una introduzione*, Milano.
- ◆ GAGE T.B. 1988, *Mathematical Hazard Models of Mortality: An Alternative to Model Life Tables*, *American Journal of Physical Anthropology*, 76 (4): 429–41.
- ◆ GAGE T.B., O'CONNOR K.A. 1994, *Nutrition and the variation in level and age patterns of mortality*, *Human Biology*, 66, pp. 77-103.
- ◆ GILBERT N. 2008, *Agent-Based Models. Quantitative Applications in the Social Sciences*, Thousand Oaks.
- ◆ GILBERT N., HEATH C. 1985, *Social Action and Artificial Intelligence*, London.
- ◆ GILBERT N., PYKA A., AHRWEILER P. 2001, *Innovation networks-a simulation approach*, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 4(3).
- ◆ GILBERT N., TROITZSCH K.G. 2009, *Simulation for the social scientist*, Berkshire.
- ◆ GIMBLETT H.R., DURNOTA B., ITAMI R.M. 1996, *Spatially-Explicit Autonomous Agents for Modelling Recreation Use in Complex Wilderness Landscapes*, *Complexity International Journal*, 3.
- ◆ GOIRAN A. 1876, *Catalogo degli oggetti presentati alla esposizione preistorica veronese inaugurata il 20 luglio 1876*, Verona.
- ◆ GOMPERTZ B. 1825, *On the Nature of the Function Expressive of the Law of Human Mortality, and on a New Mode of Determining the Value of Life Contingencies*, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 115, pp. 513–585.
- ◆ GORINI G. 1973, *La circolazione del denaro repubblicano nell'agro veronese*, *Territorio veronese*, 1973, pp. 495-516.
- ◆ GRAHAM S. 2009, *Behaviour Space: Simulating Roman Social Life and Civil Violence*, *Digital Studies/Le champ numérique*, 1(2) online at http://www.digitalstudies.org/ojs/index.php/digital_studies/article/view/172/214 (last access 30-02-2022).
- ◆ GRAHAM S. 2015, *Pulling Back the Curtain: Writing History Through Video Games*, *Web Writing - Why and How for Liberal Arts Teaching and Learning*, University of Michigan Press.

- ◆ GRIMM V. 1999, *Ten years of individual-based modelling in ecology: What have we learned, and what could we learn in the future?*, Ecol. Model, 115, pp. 129–148.
- ◆ GRIMM V. 2002, *Visual debugging: a way of analyzing, understanding, and communicating bottom-up simulation models in ecology*, Nat. Res. Model. 15(1), pp. 23–38, da *The ODD Protocol for Describing Agent-Based and Other Simulation Models: A Second Update to Improve Clarity, Replication, and Structural Realism*. JASSS, 23(2), <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/23/2/7.html> (last access: 15-03-2022).
- ◆ GRIMM V., RAILSBACK S.F. 2005, *Individual-Based Modeling and Ecology*, Princeton, NJ.
- ◆ GRIMM V., BERGER U., BASTIANSEN F., ELIASSEN S., GINOT V., GISKE J., GOSS-CUSTARD J., GRAND T., HEINZ S.K., HUSE G., HUTH A., JEPSEN J.U., JØRGENSEN C., MOOIJ W.M., MÜLLER B., PE'ER G., PIOUS C., RAILSBACK S.F., ROBBINS A.M., ROBBINS M.M., ROSSMANITH E., RÜGER N., STRAND E., SOUISSI S., STILLMAN R.A., VABØ R., VISSER U., DEANGELIS D.L. 2006, *A standard protocol for describing individual-based and agent-based models*. Ecol. Model. 115, pp. 129–148. Ecological Modelling, 198(1-2), 115–126.
- ◆ GRIMM V., RAILSBACK S.F., VINCENOT C.E., BERGER U., GALLAGHER C., DEANGELIS D.L., EDMONDS B., GE J., GISKE J., GROENEVELD J., A.S.A. JOHNSTON, A. MILLES, J. NABE-NIELSEN, J.G. POLHILL, V. RADCHUK, M.-S. ROHWÄDER, R.A. STILLMAN, J.C. THIELE, D. AYLLÓN, 2020, *The ODD Protocol for Describing Agent-Based and Other Simulation Models: A Second Update to Improve Clarity, Replication, and Structural Realism*, JASSS, 23 (2), 7.
- ◆ GUIDI A., CANDELATO F., SARACINO M. 2008, *Il popolamento del territorio veronese durante l'età del Ferro*, in *I Veneti antichi. Novità e aggiornamenti*, Atti del Convegno di Studio (Isola della Scala, 15 ottobre 2005), Verona, pp. 15-45.
- ◆ GUMERMAN G.J., SWEDLUND A.C., DEAN J.S., EPSTEIN J.M. 2003, *The Evolution of Social Behavior in the Prehistoric American Southwest*, Artificial Life, 9, pp. 435-444.
- ◆ HAGGETT P. 1965, *Locational Analysis in Human Geography*, London.
- ◆ HALES D., DORAN J. 2018, *Agent-Based Modelling Pioneers: An Interview with Jim Doran*, September 4, 2018, online at <https://rofasss.org/2018/09/04/dh/> (last access: 9-12-2021).
- ◆ HALES D., ROUCHIER J., EDMONDS B. 2003, *Model-to-model analysis*, J. Artificial Societies and Social Simulation, 6, online at <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6-4/5.html> (last access: 05-07-2021).
- ◆ HALSTEAD P. 1987, *Traditional and ancient rural economy in Mediterranean Europe: plus ça change?*, Journal of Hellenic Studies, 107, pp. 77-87.
- ◆ HARGREAVES G.H., SAMANI Z.A. 1982, *Estimating Potential Evapotranspiration*, Tech Note, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 108(3), pp. 225-230.
- ◆ HARGREAVES G.H., SAMANI Z.A. 1985, *Reference Crop Evapotranspiration from Temperature*, Applied Engineering and Agriculture, 1(2), pp. 96-99.

- ◆ HARRIS D.R. 1996, *The origins and spread of agriculture and pastoralism in Eurasia: an overview*, in HARRIS D.J. (ed), *The origins and spread of agriculture and pastoralism in Eurasia*, London, pp. 552-573.
- ◆ HARRIS M. 1990, *Antropologia culturale*, Bologna.
- ◆ HARVEY. D. 1969, *Explanation in Geography*, London.
- ◆ HAUKE J., LORSCHIED I., MEYER M. 2017, *Recent development of social simulation as reflected in JASSS between 2008 and 2014: A citation and co-citation analysis*, Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 20(1).
- ◆ HEGSELMANN R., SCHELLING T.C., SAKODA J.M. 2017, *The intellectual, technical, and social history of a model*, Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 20(3), online at <https://www.jasss.org/20/3/15.html> [doi:10.18564/jasss.3511 (last acces: 02-03-2022)]
- ◆ HEISER T., HOFMEISTER J.P. 2019, *Bathtub, Failure Distribution, MTBF, MTTF, And More: They Are Related*, online at <https://www.mfpt.org> (last access16-02-2022).
- ◆ HOLLAND J.H. 1998, *Emergence: From chaos to order*, Oxford.
- ◆ HOLZHAUSER H., MAGNY M., ZUMBUHL H.J. 2005, *Glacier and lake-level variations in western-central Europe over the last 3500 years*, The Holocene, 15-6-2005, pp. 789-801.
- ◆ HUNDT H.J. 1974, *Donauländische Einflüsse in der frühen Bronzezeit Norditaliens*, in Atti del Simposio Internazionale sulla Antica Età del Bronzo in Europa (Verona-Lazise- Trento), pp. 143-178.
- ◆ IACONO F. 2013, *Westernizing Aegean of LH III C*, in ALBERTI M.E, SABATINI S., *Exchange networks and local transformations: interaction and local change in Europe and the Mediterranean from the Bronze Age to the Iron Age*, Oxford, pp. 80-91.
- ◆ JANSSEN M.A. 2009, *Understanding Artificial Anasazi*, Journal of Artificial Societies and Social Simulation 12 (4), online at <http://jasss.soc.surrey.ac.uk> (last access: 11-09-2021).
- ◆ JANSSEN M.A., OSTROM E. 2006, *Empirically Based, Agent-Based Models*, Ecology and Society, 11 (2), 37.
- ◆ JONES R., LEVI S.T., BETTELLI M., VAGNETTI L. 2014, *Italo-Mycenaean Pottery: The Archaeological and Archaeometric Dimensions*, Incunabula graeca, Roma, pp. 588-12.
- ◆ KANIEWSKI D., VAN CAMPO E., GUIOT J., LE BUREL S., OTTO T., BAETEMAN C., 2013, *Environmental Roots of the Late Bronze Age Crisis*, PLoS ONE 8 (8): e71004.
- ◆ KEYFITZ N., FLIEGER W., 1990, *World Population Growth and Aging, Demographic Trends in the Late Twentieth Century*, Chicago.
- ◆ KISS V., KULCSÁR G. 2007, *Bronze Age Settlement Patterns in the Little Balaton Region and the Balaton Uplands*, in ZATYKÓ C., JUHÁSZ I., SÜMEGI P. (eds.),

Environmental Archaeology in Transdanubia (Varia Archaeologica Hungarica XX), Budapest, pp. 105-116.

- ◆ KNEISEL J., KIRLEIS W., DAL CORSO M., TAYLOR N., TIEDTKE V. (eds.) 2012, *Collapse or Continuity? Environment and Development of Bronze Age Human Landscapes Proceedings of the International Workshop Socio-Environmental Dynamics over the Last 12000 Years: The Creation of Landscapes* (Kiel, 14th - 18 March 2011), Bonn.
- ◆ KOHLER T.A., GUMERMAN G.J. (Eds.) 2000, *Dynamics in Human and Primate Societies: Agent Based Modeling of Social and Spatial Processes*, Oxford.
- ◆ KOHLER T.A., VARIEN M.D., WRIGHT A., KUCKELMAN K.A. 2008, *Mesa Verde Migrations: New archaeological research and computer simulation suggest why ancestral Puebloans deserted the northern Southwest United States*, *American Scientist*, 96, pp. 146-153.
- ◆ KOHLER T.A., WEST C.R.V., CARR E.P., LANGTON C.G. 1996, *Agent-Based Modeling of Prehistoric Settlement Systems in the Northern American Southwest*, in *Proceedings, Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling* (Santa Fe, NM, January 21-26), Santa Barbara, CA: National Center for Geographic Information and Analysis, online at <http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTAJFEj3D-ROM/main.html> (last access: 01-01-2022).
- ◆ KOLB C.C. 1985, *Demographic estimates in archaeology: contribution from Mesoamerican peasants*, *Current Anthropology*, 26, pp. 581-599.
- ◆ KRAMER C. 1978, *Estimating Prehistoric Populations: an ethnoarchaeological approach*, in AA. VV., *L'Archeologie de l'Iraq du début de l'Époque Néolithique à 33 avant notre Ère. Perspective et limites de l'interprétation anthropologique des documents*, Actes du Colloque International du CNRS, 580.
- ◆ LAFFINEUR R., GRECO E. (a cura di) 2005, *Emporia. Aegeans in the Central and Eastern Mediterranean*, *Proceedings of the 10th International Aegean Conference/10^e Rencontre égéenne internationale*, Athens, Italian School of Archaeology, 14-18 April 2004, *Aegaeum* 25, Liège - Austin.
- ◆ LAKE M.W. 2001, *Numerical modelling in archaeology*, in BROTHWELL D.R. e POLLARD A.M. (Eds.), *Handbook of Archaeological Sciences*, Chichester, pp. 723–732.
- ◆ LAKE, M.W. 2004, *Being in a simulacrum: Electronic agency*, in GARDNER A. (Ed.), *Agency Uncovered: Archaeological Perspectives on Social Agency, Power and Being Human*, London, pp. 191–209.
- ◆ LATOUR B., WOOLGAR S. 2013, *Laboratory life: The construction of scientific facts*, Princeton.
- ◆ LEONARD A. Jr. 1994, *An Index to the Late Bronze Age Aegean Pottery from Syria-Palestine*, Jonsered.
- ◆ LEONARDI G. 1979, *Il bronzo finale dell'Italia nord-orientale. Proposte per una suddivisione in fasi*, *Atti IIPP XXI*, Firenze, pp. 155-185.

- ◆ LEONARDI G. 1997, *I sette album di Castellazzo di Fontanellato: primi spunti critici sulla documentazione originale degli scavi pigoriniani*, in BERNABO' BREA M., CARDARELLI A., CREMASCHI M. (a cura di), *Le terramare. La più antica civiltà padana*, Milano, pp. 70-81.
- ◆ LEONARDI G. 2012, *Il capo, il sole e il villaggio: spunti interpretativi sul rapporto tra iconografia e ideologia sociale dall'età del rame alla media età del bronzo*, *Archeologia Veneta*, XXXV, pp. 30-51.
- ◆ LEONARDI G., CUPITÒ M. 2008, *Il sito arginato dell'età del bronzo di Fondo Paviani-Legnago. Notizia preliminare sulla campagna di indagine 2007*, *Quaderni di Archeologia del Veneto*, XXIV, pp. 90-93.
- ◆ LEONARDI G., CUPITÒ M. 2009, *Campagna di indagini 2008 nel sito arginato dell'età del bronzo di Fondo Paviani-Legnago (Verona). Notizia preliminare*, *Quaderni di Archeologia del Veneto*, XXV, pp. 92-96.
- ◆ LEONARDI G., CUPITÒ M. 2013, *Il Veneto tra Bronzo antico e Bronzo recente*, in GAMBA M., GAMBACURTA G., RUTA SERAFINI A., TINÈ V., VERONESE F. (a cura di), *Venetkens. Viaggio nella terra dei Veneti antichi*, Catalogo della mostra, Padova, Palazzo della Ragione, 6 aprile - 17 novembre 2013, pp. 27-34.
- ◆ LEONARDI G., ROSSI S. (a cura di) 2004, *Archeologia e idrografia del Veronese a cent'anni dalla deviazione del fiume Guà (1904-2004)*, atti della giornata di studi *La Necropoli del Fiume Nuovo* (15 maggio 2004, Cologna Veneta), *Saltuarie dal laboratorio del Piovego*, 6, p. 414.
- ◆ LEVI S.T. 2010, *Dal coccio al vasaio. Manifattura, tecnologia e classificazione della ceramica*, Bologna.
- ◆ MACY M.W., WILLER R. 2002, *From Factors to Actors: Computational Sociology and Agent-Based Models*, *Annual Review of Sociology*, 28, pp. 143-166.
- ◆ MAGNY M. 2004, *Holocene climate variability as reflected by mid-European lake-level fluctuations and its probable impact on prehistoric human settlements*, in BRAUER A., GUILIZZONI P. (eds), *The record of Human/Climate Interaction in Lake Sediments*, *Quaternary International*, 113, pp. 65-79.
- ◆ MAGNY M., RICHOZ I. 1998, *Holocene lake-level fluctuations in Lake Seedorf, southern Swiss Plateau*, in *Eclogae Geologicae Helveticae*, 91, pp. 345-347.
- ◆ MAINI E. 2012, *Lo sviluppo dell'allevamento in Emilia-Romagna Aspetti economici e implicazioni sociali nella gestione della risorsa animale durante l'età del Bronzo*, [Dissertation thesis], Alma Mater Studiorum Università di Bologna. Dottorato di ricerca in Archeologia.
- ◆ MAIORANA M., FORNARO F. 1989, *Sopravvive l'antica pratica del debbio. Il fuoco in agricoltura*, Istituto Sperimentale Agronomico-Bari, *Il Villaggio globale*, Adda Editore, 1988-1989.
- ◆ MAKEHAM W.M. 1860, *On the Law of Mortality and the Construction of Annuity Tables*, *J. Inst. Actuaries and Assur. Mag.*, 8 (6), pp. 301-310.

- ◆ MALESANI E. 1952, *La bonifica delle Valli Grandi Veronesi ed Ostigliesi* in *Studi geografici in onore di Antonio Renato Toniolo*, Milano, pp. 57-105.
- ◆ MALGARISE A. 1989-90, *Progetto Alto-Medio Polesine - Basso Veronese: un esempio di ricerca archeologica di superficie*, tesi di laurea, Università di Padova-Dipartimento di Scienze dell'Antichità, relatore prof.ssa L. Capuis, A.A. 1989-90.
- ◆ MANSON S., AN L., CLARKE K.C., HEPPENSTALL A., KOCH J., KRZYZANOWSKI B., MORGAN F., O'SULLIVAN D., RUNCK B.C., SHOOK E., TEFATSION L. 2020, *Methodological Issues of Spatial Agent-Based Models*, Journal of Artificial Societies and Social Simulation 23 (1) 3, online at <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/23/1/3.html> (last access: 05-03-2021)
- ◆ MARCHESINI M., MARVELLI S. 2005, *Analisi palinologiche condotte su un campione di torba dal sito di Ponte Moro – Cerea (Verona, Nord Italia)*, Padusa, XLI, Nuova Serie, Pisa – Roma, pp. 143-152.
- ◆ MARCHESINI M., MARVELLI S., GOBBO I., RIZZOLI E. 2010, *Il paesaggio vegetale e l'ambiente nella pianura bolognese tra Samoggia e Panaro: risultati delle indagini archeobotaniche*, in CATTANI M., MARCHESINI M., MARVELLI S. (a cura di), *Paesaggio ed economia dell'età del Bronzo. La pianura Bolognese tra Samoggia e Panaro*, Bologna, pp. 215-229.
- ◆ MARTINATI P. 1876, *Storia della paleoetnologia veronese*, Memorie dell'Accademia di Agricoltura Arti e Commercio, LIII, pp. 171-205.
- ◆ MAYEWSKI P.A., MEEKER L.D., TWICKLER M.S., WHITLOW S., YANG Q., PRENTICE M. 1997, *Major features and forcing of high latitude northern hemispheric atmospheric circulation using a 110 000 year long glaciochemical series*, Journal of Geophysical Research, 102 (12), pp. 26345–66.
- ◆ MAZZARINO S. 1988, *La fine del mondo antico*, Milano (I ed. 1959).
- ◆ MCNAB B.K. 1997, *On the Utility of Uniformity in the Definition of Basal Rate of Metabolism*, *Physiological Zoology*, 70 (6), pp. 718–720.
- ◆ MEESE D.A., GOW A.J., GROOTES P., MAYEWSKI P.A., RAM M., STUIVER M., TAYLOR K.C., WADDINGTON E.D., ZIELINSKI G.A. 1994, *The accumulation record from the GISP2 core as an indicator of climate change throughout the Holocene*, in Science, 266, pp. 1680-1682.
- ◆ MELKO M. 1969, *The Nature of Civilizations*, Porter Sargent, Boston.
- ◆ MENOTTI F. 2001, *The missing period. Middle Bronze Age lake-dwellings in the Alps*, in BAR International Series 968, London 2001.
- ◆ MERCURI A.M., ACCORSI C.A., BANDINI MAZZANTI M., BOSI G., FORLANI L., MARCHESINI M., MARVELLI S., TORRI P. 2010, *Ambiente ed economia nelle terramare: ricerche archeobotaniche nel modenese e bolognese*, in Atti della XLV Riunione Scientifica dell'Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria, *Preistoria e Protostoria dell'Emilia Romagna*, Modena 26-31 ottobre 2010.
- ◆ MERCURI A.M., ACCORSI C.A., BANDINI MAZZANTI M., BOSI G., TREVISAN GRANDI G., CARDARELLI A., LABATE D., OLMÍ L., TORRI P.

2006, *Cereal Fields from the Middle-Recent Bronze Age as found in the terramara di Montale, in the Po plain (Emilia Romagna, Northern Italy), based on pollen, seeds/fruits and microchar-coals*, in MOREL J.P., TRESSERRAS JUAN J., MATAMALA J.C. (a cura di), *The Archaeology of Crop fields and garden Archaeology*, Bari, Edipuglia, pp. 251-270.

- ◆ MIGLIAVACCA M., PIZZEGHELLO D., NARDI S. 2020, *Una strada armentaria dell'età del Bronzo nelle Valli Grandi Veronesi: il contributo delle analisi chimiche dei suoli*, Atti del Convegno Internazionale Frattresina cinquant'anni dopo. *Il Delta del Po tra Europa e Mediterraneo nei secoli attorno al 1000 a.C.*, Museo dei Grandi Fiumi di Rovigo (13-15 aprile 2018), Padusa, LVI, Nuova serie, pp. 221-227.
- ◆ MILLER H.J. 2009, *Geocomputation*, in FOTHERINGHAM A.S., ROGERSON P.A. (eds.), *The SAGE handbook of spatial analysis*, London, pp 397–418.
- ◆ MINETTI A.E., MOIA C., ROI G.S., SUSTA D., FERRETTI G. 2002 *Energy cost of walking and running at extreme uphill and downhill slopes*, *Journal of Applied Physiology*, 93(3), pp.1039-46.
- ◆ MONKS T., CURRIE C.S.M., ONGGO B.S., ROBINSON S., KUNC M., TAYLOR S.J.E. 2019, *Strengthening the Reporting of Empirical Simulation Studies: Introducing the STRESS Guidelines*, *Journal of Simulation*, 13 (1), pp. 55–67.
- ◆ MONTANARI M. 1984, *Rese cerealicole e rapporti di produzione*, in MONTANARI M., *Campagne Medievali.Strutture produttive, rapporti di lavoro, sistemi alimentari*, Piccola Biblioteca Einaudi,Torino, pp. 55-85.
- ◆ MONTEITH J.L. 1965, *Evaporation and environment*, *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 19, pp. 205–234.
- ◆ MOONESINGHE R., KHOURY M.J., JANSSENS A.C.J. 2007, *Most published research findings are false – but a little replication goes a long way*, *PLoS medicine*, 4(2), p. 28.
- ◆ MORINEAU M. 1997, *Crescere senza sapere perché: strutture di produzione, demografia e razioni alimentari*, in FLANDRIN J., MONTANARI M. (a cura di), *Storia dell'alimentazione*, Roma-Bari, pp.447-464.
- ◆ MÜLLER B., BALBI S., BUCHMANN C.M., DE SOUSA L., DRESSLER G., GROENEVELD J., KLASSERT C.J., LE Q.B., MILLINGTON J.D.A., NOLZEN H., PARKER D.C., POLHILL J.G., SCHLÜTER M., SCHULZE J., SCHWARZ N., SUN Z., TAILLANDIER P., WEISE H. et al. 2014, *Standardised and Transparent Model Descriptions for Agent-Based Models: Current Status and Prospects*, *Environmental Modelling & Software* 55 (5), pp. 156–63.
- ◆ MÜLLER B., BOHN F., DREßLER G., GROENEVELD J., KLASSERT C., MARTIN R., SCHLÜTER M., SCHULZE J., WEISE H., SCHWARZ N. 2013, *Describing human decisions in agent-based models - ODD + D, an extension of the ODD protocol*, *Environmental modelling & software*, 48, pp. 37-48.
- ◆ NARROL R. 1962, *Floor area and settlement population*, *American Antiquity*, pp. 587-589.

- ◆ NEGRONI CATAACCHIO N. 2015, *Nuovi dati sui vaghi tipo Tirinto e Allumiere, nel quadro della Protostoria del Venetorum Angulus*, in LEONARDI G., TINÉ V. (a cura di), *Preistoria e Protostoria del Veneto*, Studi di Preistoria e Protostoria - 2: Firenze, 2015, pp. 805-810.
- ◆ NEGRONI CATAACCHIO N., GALLO V. 2016, *L'ambra in Italia. Le vie di penetrazione e la diffusione durante la protostoria*, in CELLAROSI P., CHIELLINI R., MARTINI F., MONTANARI A. (a cura di), *Le vie dell'ambra*, San Merino, pp. 313-336.
- ◆ NEUTENS T., WITLOX F., VAN DE WEGHE N., DE MAEYER P.H. 2007, *Space-time opportunities for multiple agents: a constraint-based approach*, International Journal of Geographical Information Science, 21(10), pp. 1061–1076.
- ◆ NICOSIA C. 2003-2004, *Analisi micromorfologiche nelle Valli Grandi Veronesi: processi formativi del record archeologico e dinamiche pedo-alluvionali alla fine dell' Età del Bronzo*, Tesi di Laurea, Università di Padova.
- ◆ NICOSIA C. 2011, *Suoli sepolti olocenici al margine appenninico centro-padano: aspetti geoarcheologici e paleo ambientali*, Tesi di dottorato in Scienze Naturalistiche ed Ambientali, Università degli Studi di Milano, Scuola di Dottorato: Terra, ambiente e biodiversità, ciclo XXIII.
- ◆ NICOSIA C., BALISTA C., CUPITÒ M., ERTANI A., LEONARDI G., VIDALE M. 2011, *Anthropogenic deposits from the Bronze Age site of Fondo Paviani (Verona, Italy): Pedomorphological and micropedological characteristics*, Quaternary International, 243, (2), pp. 280–292.
- ◆ NISBET R. 1994, *Alcuni aspetti dell'ambiente umano nelle Alpi Cozie fra quinto e quarto millennio BP*, in BIAGI P., NANDRIS J. (eds.), *Highland Zone Exploitation in Southern Europe*, Monografie di Natura Bresciana, 20, pp. 259-271.
- ◆ NISBET R., ROTTOLI M. 1997, *Le analisi dei macroresti vegetali dei siti dell'età del Bronzo*, in M. BERNABÒ BREA, A. CARDARELLI, M. CREMASCHI (a cura di), *Le terramare: la più antica civiltà padana*, Milano, pp. 469-474.
- ◆ O'SULLIVAN D. 2001, *Exploring spatial process dynamics using irregular cellular automaton models*, Geographical Analysis, 33, pp. 1–18.
- ◆ OLSON D.L. 2003, *System Dynamics*, in *Encyclopedia of Information Systems*, IIIA.
- ◆ OMBONI G. 1876, *L'esposizione di oggetti preistorici che ebbe luogo a Verona dal 20 febbraio al 3 aprile 1876*, Atti del Reale Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, II, pp. 1-16.
- ◆ OROMBELLI G. 1997, *Le condizioni climatiche durante il II millennio a.C.*, in BERNABÒ BREA M., CARDARELLI A., CREMASCHI M. (a cura di), *Le terramare. La più antica civiltà padana*, Milano 1997, pp. 51-58.
- ◆ OSTROM T. 1988, *Computer simulation: The third symbol system*, Journal of Experimental Social Psychology, 24, pp. 381–392.
- ◆ PAL C.V., LEON F., PAPRZYCKI M., GANZHA M. 2020, *A Review of Platforms for the Development of Agent Systems*, ArXiv abs/2007.08961.

- ◆ PARKER D.C., FILATOVA T. , 2008, *A conceptual design for a bilateral agent-based land market with heterogeneous economic agents*, Computers, Environment and Urban Systems, 32 (6), pp. 454-463.
- ◆ PARKER D.C., MANSON S.M., JANSSEN M.A., HOFFMANN M.J., DEADMAN M.J. 2003, *Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: a review*, Annals of the Association of American Geographers, 93, pp. 316-340.
- ◆ PASA A., FASANI L. 1964/66, *Ricerche preistoriche effettuate a cura del Museo Civico di Storia Naturale di Verona negli anni 1960-1965*, *Sibrium*, VIII, pp. 215-218.
- ◆ PEARCE M. 1998, *New research on the terramare of northern Italy*, in *Antiquity*, 7, pp. 743-746.
- ◆ PEARCE M. 2019, *Frattesina la prospettiva europea*, in BIETTI SESTIERI A.M., BELLINTANI P., GIARDINO C. (eds.), *Frattesina: un centro internazionale di produzione e di scambio nella Tarda Età del Bronzo del Veneto*, Atti della Accademia nazionale dei Lincei, anno CDXV –2018, Classe di Scienze Morali, Storiche e Filologiche, Memorie (IX serie), 39, 1, Roma, pp. 339-351.
- ◆ PEARCE M., DE GUIO A. 1999, *Between the mountains and the plain: an integrated metals production and circulation system in later Bronze Age north-eastern Italy*, in DELLA CASA P.(ed.), *Prehistoric alpine environment, society, and economy*, Papers of the international colloquium PAESE 1997 in Zurich, "Universitätsforschungen zur prähistorischen Archäologie", 55, Bonn, pp. 289-293.
- ◆ PENMAN H.L., 1948, *Natural evaporation from open water, bare soil, and grass*, Proceedings of the Royal Society, London, A193, pp. 120–145.
- ◆ PEREGO R., BADINO F., DEADDIS M., RAVAZZI C., VALLE F., ZANON M. 2011, *L'origine del paesaggio agro-pastorale in nord Italia: espansione di *Orlaya grandiflora* (L.) Hoffm. nella civiltà palafitticola dell'età del Bronzo della regione del Garda*, *Notizie Archeologiche Bergomensi*, 19, Civico Museo Archeologico di Bergamo, pp. 161-173.
- ◆ PERETTO R. 1984, *Nuove scoperte del Bronzo finale a Fratta Polesine*, *Padusa*, XX, p. 545.
- ◆ PERETTO R. 1985, *Nuovi contributi allo studio della paleoidrografia nel territorio polesano*, *Padusa*, XXI, pp. 123-132.
- ◆ PERETTO R. 1986, *Ambiente e strutture antropiche nell'antico Polesine*, in *L'antico Polesine – Testimonianze archeologiche e paleoambientali*, catalogo delle esposizioni di Adria e Rovigo (febbraio-novembre 1986) Padova, pp. 21-100.
- ◆ PERONI R. 1959, *Per una definizione dell'aspetto culturale "subappenninico" come fase cronologica a sé stante*, *MemLinc CCCLVI*, Classe di Scienze morali, storiche e filologiche VIII, IX, 1.
- ◆ PERONI R. 1996, *L'Italia alla soglie della storia*, Roma-Bari.
- ◆ PERONI R. 2004, *Culti, comunità tribali e gentilizie, caste guerriere e figure di eroi e principi nel secondo millennio in Italia fra Europa centrale ed Egeo*, in GLEIRSCHER P., MARZATICO F. (a cura di), *Guerrieri, principi ed eroi fra il Danubio e il Po dalla preistoria all'alto Medioevo*, Trento, pp. 160-173.

- ◆ PEYRON O., COMBOURIEU-NEBOUT N., BRAYSHAW D., GORING S., ANDRIEU-PONEL V., DESPRAT S., FLETCHER W., GAMBIN B., IOAKIM C., JOANNIN S., KOTTHOFF U., KOULI K., MONTADE V., PROSS J., SADORI L., MAGNY M., 2017, Precipitation Changes in the Mediterranean Basin during the Holocene from Terrestrial and Marine Pollen Records: A Model–Data Comparison, *Climate of the Past*, 13 (3), pp. 249–65.
- ◆ PIGORINI L. 1876, *Esposizione preistorica di Verona*, *Bullettino di Paletnologia Italiana*, II, pp. 129-138.
- ◆ PIGORINI L. 1909, *I primitivi abitatori dell'Italia*, *Nuova Antologia*, Fascicolo 909, pp.277-297.
- ◆ PIOVAN S. 2008, *Evoluzione paleoidrografica della pianura veneta meridionale e rapporto Uomo-Ambiente nell'Olocene*, Quaderni di Dottorato, Università degli Studi di Padova.
- ◆ PIOVAN S., MOZZI P., STEFANI C. 2010, *Bronze Age Paleohydrography of the southern Venetian Plain*, *Geoarcheology*, 25(1), pp. 6-35.
- ◆ PIOVAN S., MOZZI P., ZECCHIN M. 2012, *The interplay between adjacent Adige and Po alluvial systems and deltas in the late Holocene (Northern Italy)*, *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 4, pp. 427-440.
- ◆ PITT W.C., BOX P.W., KNOWLTON F.F. 2003, *An individual-based model of canid populations: modelling territoriality and social structure*, *Ecological Modelling*, 166, pp. 109–121.
- ◆ POPPER K. 2005, *The Logic of Scientific Discovery*. Abingdon-on-Thames: Routledge.
- ◆ PREMO L.S. 2007, *Exploratory agent-based models: Towards an experimental ethnoarchaeology*, in CLARK J.T. e HAGEMEISTER E.M. (eds.), *Digital discovery: exploring new frontiers in human heritage*, CAA 2006, *Computer applications and quantitative methods in archaeology*, Budapest, pp. 29–36.
- ◆ PREMO L.S. 2010, *Equifinality and explanation: the role of agent-based modeling in postpositivist archaeology*, in COSTOPOULOS A. e LAKE M. (eds.), *Simulating change: archaeology into the twentyfirst century*, Salt Lake City: University of Utah Press, pp. 28–37.
- ◆ PREMO L.S., MURPHY J.T., SCHOLNICK J.B., GABLER B.M. e BEAVER J.M. 2005, *Making a case for agent-based modeling*, *Society for Archaeological Sciences Bulletin*, 28(3), pp. 11–13.
- ◆ PRESTON S.H. 1976, *Mortality Patterns in National Populations*, New York.
- ◆ PRYOR F. 2006, *Farmers in prehistoric Britain*, Stroud, Gloucestershire.
- ◆ PUCCI G. 1989, *I consumi alimentari*, in GABBA E., SCHIAVONE A., *Storia di Roma*, IV, *Caratteri e Morfologie*, Torino, pp. 369-388.
- ◆ RAILSBACK S.F., GRIMM V. 2019, *Agent-based and individual-based modeling: a practical introduction*, Princeton.

- ◆ RAVAZZI C., CREMASCHI M., FORLANI L. 2004, *Studio archeopalinologico. Nuovi dati, analisi floristica e sintassonomica della vegetazione nell'età del Bronzo*, in BERNABÒ BREA M., CREMASCHI M. (a cura di), *Il Villaggio Piccolo della Terramara Santa Rosa a Poviglio. Scavi 1987-1992*, Firenze, pp. 703-736.
- ◆ RAVAZZI C., PINI R. 2013, *Clima, vegetazione forestale e alpeggio tra la fine del Neolitico e l'inizio dell'età del Bronzo nelle Alpi e in Pianura Padana*, in DE MARINIS R.C. (ed.), *L'età del Rame. La Pianura Padana e le Alpi al tempo di Ötzi*, Brescia, pp. 69-86.
- ◆ REMM M. 1998, *Robot Auto Racing Simulation Project*, March 1997. Estonia: Institute of Molecular and Cell Biology, Tartu University, online at <http://www.ebc.ee/~mremm/rars/main.htm> (last access: 05-01-2022).
- ◆ RENFREW C. 1984, *Approaches to Social Archaeology*, Cambridge, Mass: Harvard University Press.
- ◆ REYNOLDS P. J. 1992, *Crop yields of the prehistoric cereal types emmer and spelt: the worst option*, in ANDERSON P.C. (ed.) *Préhistoire de l'Agriculture: Nouvelles Approches Expérimentales et Ethnographiques*. Paris: CNRS, Monographie du CRA 6, pp. 383-393.
- ◆ RIEDEL A. 1996, *L'archeozoologia del veronese: cenni sul suo sviluppo e sui risultati delle ricerche dell'ultimo decennio*, in BELLUZZO G., SALZANI L. (a cura di), *Dalla terra al museo*, Legnago, pp. 169-178.
- ◆ RIEDEL A. 2004, *La fauna*, in BERNABÒ BREA M., CREMASCHI M. (a cura di) 2004, *Il Villaggio Piccolo della Terramara Santa Rosa a Poviglio. Scavi 1987-1992*, Firenze, pp. 703-736.
- ◆ RIOLO R., COHEN M., AXELROD R.M. 2001, *Cooperation without reciprocity*, Nature, 414(6862), p.441.
- ◆ RIZZETTO G. 1996, *Terranegra (Legnago)*, in BELLUZZO G., SALZANI L. (a cura di), *Dalla terra al museo. Mostra di reperti preistorici e protostorici degli ultimi dieci anni di ricerca del territorio veronese*, Legnago, pp. 287-290.
- ◆ RIZZETTO G., SALZANI L. 1975, *Terranegra*, in Bollettino del Museo Civico di Storia Naturale di Verona, II, pp. 478-481.
- ◆ ROSAUER D.F., JETZ W. 2015, *Phylogenetic endemism in terrestrial mammals*, Global Ecology and Biogeography, 24, pp. 168-179.
- ◆ RÖTHLISBERGER F. 1986, *10,000 Jahre Gletschergeschichte der Erde*, Sauerländer, Aarau, p. 52.
- ◆ RUSSELL S., NORVIG P. 2003, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, Upper Saddle River.
- ◆ SADORI L., GIRAUDI C., PETITTI P., RAMRATH A. 2004, *Human impact at Lago di Mezzano (central Italy) during the Bronze Age: a multidisciplinary approach*, Quaternary International, 113, pp. 5-17.
- ◆ SAKODA J.M. 1971, *The checkerboard model of social interaction*, Journal of Mathematical Sociology, 1, pp. 119-132.

- ◆ SALZANI L. (a cura di) 1987, *La preistoria lungo la valle del Tartaro*, Centro Studi per la Storia della Bassa Veronese, Verona.
- ◆ SALZANI L. (a cura di) 2005, *La necropoli dell'età del bronzo all'Olmo di Nogara*, Memorie del Museo Civico di Storia Naturale di Verona, II, Sezione Scienze dell'Uomo, 8.
- ◆ SALZANI L. 1982, *Recenti rinvenimenti nel Veronese*, Aquileia Nostra, LIII, pp. 2-15.
- ◆ SALZANI L. 1986, *Canàr di S. Pietro Polesine (comune di Castelnuovo Bariano)*, Quaderni di Archeologia del Veneto, II, pp. 19-21.
- ◆ SALZANI L. 1993, *Gazzo, abitato dell'età del bronzo in località Castel di Maccacari*, in Quaderni di Archeologia del Veneto, IX, pp. 86, 88.
- ◆ SALZANI L. 1994a, *Il deposito votivo dell'età del bronzo da Corte Lazise di Villabartolomea (VR)*, in *Studi di Archeologia della X Regio, in ricordo di Michele Tombolani*, Roma, pp. 57-64.
- ◆ SALZANI L. 1994b, *Nogara, rinvenimento di un ripostiglio di bronzi in località "Pila del Brancòn"*, Quaderni di Archeologia del Veneto, X, pp. 83-94.
- ◆ SALZANI L. 1997, *Nogara, palafitta dell'età del bronzo in loc. Dossetto*, Quaderni di Archeologia del Veneto, XIII, p. 73.
- ◆ SALZANI L. 1998/99, *Sepulture dell'antica età del bronzo da Valserà di Gazzo Veronese (VR)*, Padusa, XXXIV/XXXV, pp. 63-75.
- ◆ SALZANI L. 2001, *Gazzo. La necropoli di Ponte Nuovo*, Quaderni di Archeologia del Veneto, XVII, pp. 75-80.
- ◆ SALZANI L. 2002a, *Età del Ferro*, in ASPES A. (a cura di), *Preistoria Veronese. Contributi e aggiornamenti*, Memorie del Museo Civico di Storia Naturale di Verona, n.5, pp.157-215.
- ◆ SALZANI L. 2002b, *L'insediamento di Canàr di S. Pietro Polesine*, in ASPES A. (a cura di), *Preistoria veronese. Contributi e aggiornamenti*, pp. 110-111.
- ◆ SALZANI L. 2005, *La necropoli dell'Età del Bronzo all'Olmo di Nogara*, Museo Storia Naturale, Verona.
- ◆ SALZANI L. 2007, *Cologna Veneta. Indagini archeologiche lungo il tracciato del metanodotto*, Quaderni di Archeologia del Veneto, XXIII, pp. 81-84.
- ◆ SALZANI L. 2009, *Villabartolomea. Ritrovamenti dell'età del bronzo in località Ansion*, Quaderni di Archeologia del Veneto, XXIV, pp. 89-91.
- ◆ SALZANI L. 2011, *Campestrin di Grignano Polesine (Rovigo)*, in MARZATICO F., GEBHARD R., GLEIRSCHER P. (a cura di), *Le grandi vie delle civiltà. Relazioni e scambi fra Mediterraneo e il centro Europa dalla preistoria alla romanità*, Catalogo della mostra di Trento, Museo del Castello del Buonconsiglio, Trento, pp. 429-430.
- ◆ SALZANI L., CHELIDONIO G. 1992, *Abitato dell'età del bronzo in località "I Camponi" di Nogarole Rocca*, Padusa, XXVIII, pp. 53-86.

- ◆ SALZANI L., MARTINELLI N., BELLINTANI P. 1996, *La palafitta di Canà di S. Pietro Polesine (Rovigo)*, in COCCHI GENICK D. (a cura di), *L'antica età del bronzo in Italia*, Atti del convegno di Viareggio (9-12 gennaio 1995), pp. 281-290.
- ◆ SALZANI L., VAGNETTI L., JONES R.E., LEVI S.T. 2006, *Nuovi ritrovamenti di ceramiche di tipo egeo dall'area veronese: Lovara, Bovolone e Terranegra*, Atti IIPP XXXIX, pp. 1145-1157.
- ◆ SANDEL B., ARGE L., DALSGAARD R., DAVIES R.G., GASTON K.J., SUTHERLAND W.J., SVENNING J.C. 2011, The influence of Late Quaternary climate-change velocity on species endemism, *Science*, 334, pp. 660–664.
- ◆ SARACINO M., SBOARINA M. 2010, *Analisi dei materiali ceramici provenienti dal centro protourbano di Oppeano-ex Fornace (campagna di scavo 2003)*, Bollettino del Museo Civico di Storia Naturale di Verona, 34, pp. 37-49.
- ◆ SAVAGE M., ASKENAZI M. 2000, *Arborscapes: A Swarm-Based Multi-Agent Ecological Disturbance Model*, Geographical and Environmental Modelling, Santa Fe Institute, online at <https://www.santafe.edu/research/results/working-papers/arborscapes-a-swarm-based-multi-agent-ecological-d> (last access: 01-01-2022).
- ◆ SCHELLING T.C. 1971, *Dynamic models of segregation*, Journal of Mathematical Sociology, 1, pp. 143-186.
- ◆ SERENI E. 1979, *Terra nuova e buoi rossi: le tecniche del debbio e la storia dei disboscamenti e dissodamenti in Italia*, Bologna.
- ◆ SHERRATT A. 1997, *Economy and Society in Prehistoric Europe. Changing Perspectives*, Edinburgh.
- ◆ SHI W., PANG M.Y.C. 2000, *Development of Voronoi-based cellular automata: An integrated dynamic model for geographical information systems*, International Journal of Geographical Information Science, 14, pp. 455–474.
- ◆ SIMON H.A. 1981, *The Architecture of Complexity*, in *The Science of the Artificial* 2d ed., Cambridge.
- ◆ SIMON H.A. 1982, *Models of bounded rationality*, Cambridge.
- ◆ SIMON H., 1991, *Models of My Life*, New York.
- ◆ SIMONS D.J. 2014, *The value of direct replication*, *Perspectives on Psychological Science*, 9(1), pp. 76–80.
- ◆ SOKOLOWSKI J.A., BANKS C.M. 2009, *Modeling and Simulation for Analyzing Global Events*, London.
- ◆ STANILOV K. 2012, *Space in agent-based models*, in HEPPENSTALL A.J., CROOKS A.T., SEE L.M., BATTY M. (eds.), *Agent-Based Models of Geographical Systems*, Dordrecht, Netherlands: Springer, pp. 253–269.
- ◆ STONEDAHL F., WILENSKY U. 2010, *Evolutionary Robustness Checking in the Artificial Anasazi Model*, in AAAI Fall Symposium: Complex Adaptive Systems.
- ◆ SUN Z., LORSCHIED I., MILLINGTON J.D., LAUF S., MAGLIOCCA N.R., GROENEVELD J., BALBI S., NOLZEN H., MÜLLER B., THOBER J.,

- BUCHMANN C.M., 2016, *Simple or Complicated Agent-Based Models? A Complicated Issue*, Environmental Modelling & Software, 86 pp. 56–67.
- ◆ TAINTER JOSEPH A. 1988, *The Collapse of Complex Societies*, New Studies in Archaeology, Cambridge-New York.
 - ◆ THORNTHWAITE C.W. 1948, *An approach toward a rational classification of climate*, Geographical Review, 38(1), pp. 55–94.
 - ◆ THORNTHWAITE C.W., MATHER J.R. 1955, *The water balance*, Climatology, 8, pp. 1-104.
 - ◆ THORNTHWAITE C.W., MATHER J.R. 1957, *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*, Climatology, 10, pp. 181-311.
 - ◆ TINNER W., LOTTER A.F., AMMANN B., CONEDERA M., HUBSCHMID P., VAN LEEUWEN J.F.N., WEHRLI M. 2003, *Climatic Change and Contemporaneous Land-Use Phase North and South of the Alps 2300 BC to 800 AD*, Quaternary Science Reviews, 22, pp. 1447-1460.
 - ◆ TIRABASSI J. 1997, *La Braglia*, in BERNABÒ BREA M., CARDARELLI A., CREMASCHI M. (a cura di), *Le terramare. La più antica civiltà padana*, Milano, pp. 313-314.
 - ◆ TIRABASSI J. 2009, *Fotoevidenze archeologiche dell'età del bronzo nel Veneto sud-occidentale – Prima parte*, Quaderni di Archeologia del Mantovano, 8, pp. 41-116.
 - ◆ TISDELL C., 1996, *Bounded Rationality and Economic Evolution: A Contribution to Decision Making, Economics, and Management*, Cheltenham.
 - ◆ TOBLER W. 1975, *Spatial Interaction Patterns*, Journal of Environmental Systems, 6, pp. 271-301.
 - ◆ TOBLER W. 1993, *Three presentations on geographical analysis and modeling: Non-isotropic geographic modeling speculations on the geometry of geography global spatial analysis*, Santa Barbara
 - ◆ TOZZI P., HARARI M. 1990, *Tempi di un territorio. Atlante aerofotografico delle Valli Grandi Veronesi*, Parma.
 - ◆ TROITZSCH K. 1997, *Social Simulation -- Origins, Prospects, Purposes.*, in *Simulating Social Phenomena*, Berlin.
 - ◆ TURC L. 1961, *Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date*, Annals of Agronomy, 12(1), 13–49.
 - ◆ VAGNETTIL. 2010, *Western Mediterranean*, in CLINE E. (ed.), *The Oxford Handbook of the Bronze Age Aegean (ca. 3000-1000 BC)*, Oxford, pp. 890-905.
 - ◆ VALLOIS H.V. 1937, *La durée de la vie chez l'homme fossile*, L'Anthropologie, 47, pp. 499-532.
 - ◆ VALLOIS H.V. 1960, *Vital statistic in prehistoric population as determined from archaeological data*, in MEIZER R.F., COOK S.F. (a cura di), *The application of quantitative methods in archaeology*, London.

- ◆ VAN DER VEEN M., PALMER C. 1997, *Environmental Factors and the Yield Potential of Ancient Wheat Crops*, Journal of Archaeological Science, 24(2), pp. 163–182.
- ◆ VAN WIJNGAARDEN G.J. 2002, *Use and Appreciation of Mycenaean Pottery in the Levant, Cyprus and Italy (1600-1200 BC)*, Amsterdam.
- ◆ VANZETTI A. 1994, *Orizzonti di riempimento dei fossi agrari dell'età del Bronzo media e recente*, in DE GUIO A., WHITEHOUSE R.D., WILKINS J. (a cura di), *Progetto Alto-Medio Polesine: settimo rapporto*, Quaderni di Archeologia del Veneto, X, pp. 115-130.
- ◆ VANZETTI A. 1997, *Lo "off-site": transetto di ricognizione tra Fondo Paviani e Fabbrica dei Soci*, in BERNABO' BREA M., CARDARELLI A., CREMASCHI M. (a cura di), *Le Terramare. La più antica civiltà padana*, catalogo della mostra, Milano, pp. 161-165.
- ◆ VAZ M., KARAOLIS N., DRAPER A., SHETTY P. 2005, *A compilation of energy costs of physical activities*, Public Health and Nutrition, 8(7A), pp. 1153-83.
- ◆ VENTURA V. 2005-2006, *L'abitato dell'età del Bronzo di Marendole*, Tesi di Laurea, Università di Padova, relatore prof. G. Leonardi.
- ◆ VICENZUTTO D. 2017, *Il fenomeno degli abitati fortificati di pianura dell'età del bronzo nell'Italia settentrionale a nord del Po: terramare, siti arginati e castellieri*, Tesi di dottorato, Università degli Studi di Padova, rel. prof M. Cupitò.
- ◆ VINCENOT C.E. 2018, *How New Concepts Become Universal Scientific Approaches: Insights from Citation Network Analysis of Agent-Based Complex Systems Science*, Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences 285 (1874)
- ◆ WALLENTIN G. 2017, *Spatial simulation: A spatial perspective on individual-based ecology - A review*, Ecological Modelling, 350, pp. 30–41.
- ◆ WEBER M. 1995, *Economia e società, II - Economia e tipi di comunità (1922)*, Roma: Edizioni di Comunità.
- ◆ WEIBULL W. 1951, *A statistical distribution function of wide applicability*, PDF, Journal of Applied Mechanics, 18 (3): pp. 293–297.
- ◆ WEIGELT P. STEINBAUER M.J., CABRAL J.S., KREFT H. 2016, Late Quaternary climate change shapes island biodiversity, Nature, 532, pp. 99–102.
- ◆ WEISS K.M. 1973, *Demographic Models for Anthropology*, Washington, D.C., Society for American Archaeology.
- ◆ WESTERVELT J.D. 2002, *Geographic Information Systems and Agent-Based Modeling*, in GIMBLETT (ed.), *Integrating geographic information systems and agent-based modeling techniques for simulating social and ecological processes*, , Oxford, pp. 83-104.
- ◆ WHITEHOUSE R. 1990, *Datazioni al radiocarbonio dal sito di Canàr (Bronzo antico)*, in DE GUIO A., WILKINS J., WHITEHOUSE R. 1990, *Progetto Alto-Medio Polesine – Basso Veronese: quarto rapporto*, Quaderni di Archeologia del Veneto, VI, pp. 220-221.

- ◆ WILENSKY U., RAND W. 2015, *An Introduction to Agent-Based Modeling: Modeling Natural, Social, and Engineered Complex Systems with NetLogo*; Cambridge, (Massachusetts).
- ◆ WILKINSON M.D., DUMONTIER M., AALBERSBERG I.J., APPLETON G., AXTON M., BAAK A., BLOMBERG N., BOITEN J.W., DA SILVA SANTOS L.B., BOURNE P.E. 2016, *The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship*. Scientific Data, 3.
- ◆ WOOD J.W., HOLMAN D.J., O'CONNOR K., FERRELL R.J. 2002, *Paleodemography: Mortality models for paleodemography*.
- ◆ WOOLDRIDGE, M., JENNINGS, N. 1995, *Intelligent agents: Theory and practice*, The Knowledge Engineering Review, 10(2), pp.115-152.
- ◆ YATES D.T. 2007, *Land, Power and Prestige. Bronze Age field systems in Southern England*, Exeter.
- ◆ ZACHARIAS G.L., MACMILLAN M., VAN HEMEL S.B. 2008: *Behavioral Modeling and Simulation: From Individuals to Societies*, Washington, National Academies Press.
- ◆ ZERNER C., ZERNER P., WINDER J. 1993, *Wace and Blegen: Pottery as Evidence for Trade in the Aegean Bronze Age 1939-1989 Proceedings of the International Conference, (Held at the American School of Classical Studies at Athens, Athens, December 2-3, 1989)*, Amsterdam.
- ◆ ZORZI F. 1955a, *Le palafitte o terramare del basso veronese e il problema dei palafitticoli in genere*, *Sibrium*, II, pp. 157-174.
- ◆ ZORZI F. 1955b, *Stazione palafitticola preistorica e romana alle Morandine di Cerea (Verona)*, *Atti dell'Accademia di Agricoltura, Scienze e Lettere di Verona*, VI(V), pp. 131-141.

SITOGRAFIA:

- ◆ NetLogo Modeling Commons, [<http://modelingcommons.org>] - ultimo accesso marzo 2022.
- ◆ CoMSES network, [<https://www.comses.net/>] - ultimo accesso marzo 2022.
- ◆ The Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, [<https://ccl.northwestern.edu/>] - ultimo accesso marzo 2022.
- ◆ Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto, [<https://www.arpa.veneto.it/>] - ultimo accesso marzo 2022.
- ◆ Geoportale ARPA Veneto - Portale geografico dell'Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto, [<https://gaia.arpa.veneto.it/>] - ultimo accesso marzo 2022.

- ◆ Geoportale Regione Lombardia, [<https://www.geoportale.regione.lombardia.it/>] - ultimo accesso marzo 2022.

Appendice A: Codice completo

extensions [table gis nw]

globals [

season

temperatures-oscillation-range

BIO_MeanSPRING

BIO_MaxSP

BIO_MinSP

BIO_prec_SP

BIO_MeanSUMMER

BIO_MaxSU

BIO_MinSU

BIO_prec_SU

BIO_MeanAUTUMN

BIO_MaxA

BIO_MinA

BIO_prec_A

BIO_MeanWINTER

BIO_MaxW

BIO_MinW

BIO_prec_W

elevation

dataset

river-dataset

watertable-oscillation

fringes

textures

R0

soil-moistures

optimum-moistures

critical-min-T

critical-max-T

optimum-T

crop-productions_kg/ha

crop-energy

need-of-cereals-per-person

migrant-households

better-places

metal-source

metal-demander

]

breed [sites site]

breed [households household]

breed [borders border]

breed [nodes node]

directed-link-breed [relational-links relational-link]

directed-link-breed [connective-links connective-link]

relational-links-own [reputation]

nodes-own [mud? water? forest?]

connective-links-own [

slope

slope-coefficient

weight]

patches-own [

p-node

altitude

DTMcol

my-site

identity

soil-texture

soil-weight

wilting-point

field-capacity

saturation-point

my-soil-weight

my-wilting-point

my-field-capacity

my-saturation-point

soil-water

MeanT

MaxT

MinT

Precipitations

MeanSPRING
MaxSP
MinSP
SPRING-precipitations
MeanSUMMER
MaxSU
MinSU
SUMMER-precipitations
MeanAUTUMN
MaxA
MinA
AUTUMN-precipitations
MeanWINTER
MaxW
MinW
WINTER-precipitations
MeanSPRING-increase
MaxSP-increase
MinSP-increase
SPRING-precipitations-increase
MeanSUMMER-increase
MaxSU-increase
MinSU-increase
SUMMER-precipitations-increase
MeanAUTUMN-increase
MaxA-increase
MinA-increase
AUTUMN-precipitations-increase

MeanWINTER-increase
MaxW-increase
MinW-increase
WINTER-precipitations-increase
previous-moisture
last-year-moistures
last-year-previous-moisture
estimated-soil-moisture
soil-moisture
workers-here
productivity
production
crop-type
charge
soil-fertility
crop-suitability
season-productivity
last-year-production
structures?
evapotranspiration

]

sites-own [

name
population
my-households
migration-capacity
hunger-effect-coefficient

exchange-distance
seasonal-reserve
my-node
tot-female-infans-a
tot-male-infans-a
tot-female-infans-b
tot-male-infans-b
tot-female-juvenes
tot-male-juvenes
tot-female-adultus
tot-male-adultus
tot-female-maturus
tot-male-maturus
tot-female-seniles
tot-male-seniles
infans-a
infans-b
juvenes
adultus
maturus
seniles
death-rate
need-of-crops
my-metal-distance
m-import-potential
m-export-potential
reserve
offer

demand
necessity
availability
exchange-potential
partner
old-reserve
gain
loss
exchange-balance
priority-1
priority-2
priority-3
adjustment
need-of-forest
hunger
my-farthest-patch
minimum-forest-threshold
last-mean-production
my-patches
crops
grass
pastures
forest
site-area
river
]
households-own [
family

m-family-clock

f-family-clock

my-home

dead-gender

new-home

full-nutrition-benefit

]

borders-own [

 b-node

 offer-1

 demand-1

 favourite

]

;-----PROCEDURA DI SETUP-----

to setup

 clear-all

 reset-ticks

 load-DTM

 load-soil-map

 set-soil-parameters

 load-season-maps

 set-patch-climate

 repeat 4 [set-new-season]

 setup-borders

 load-rivers

 load-sites

 setup-offsites

```

ask n-of (count patches with [identity = 0] * forest%) patches with [identity = 0] [become-forest]
ask patches with [identity = 0][become-grass]
update-site-patches
set-site-parameters
set-crop-parameters
initialize-soil-moistures
setup-patch-fertility
setup-network
setup-borders
setup-metal-distance
plan-production
choose-crop-type
assign-workers
compute-productivity
produce-agriculture
setup-relational-links

end

to setup-offsites
  setup-site-areas
  setup-crops
  setup-pastures
  setup-forest
  ask sites [update-river]
  ask sites [update-my-patches]
end

to setup-site-areas
  ask sites [

```

```

if count patches with [my-site = myself] with [identity != "river"] < site-area [
  let to-settlement site-area - (count patches with [my-site = myself] with [identity = "settlement"])
  ask min-n-of to-settlement patches with [identity != "settlement"] [distance myself]
    [set my-site myself
      become-site-area]
]]
end

to setup-crops
ask sites [
  if count patches with [my-site = myself] with [identity = "crops"] < crops[
    ask min-n-of crops patches with [identity != "settlement"] with [identity != "river"] [distance myself]
      [set my-site myself
        become-crops]
  ]
end

to setup-pastures
ask sites [
  let need-of-pastures population * 1.5
  ask min-n-of need-of-pastures patches with [identity != "settlement"] with [identity != "crops"] with [identity != "river"] [distance myself]
    [set my-site myself
      become-pastures
    ]
  set pastures patches with [my-site = myself] with [identity = "pastures"]
]
end

to setup-forest
ask sites [

```

```

    if count patches with [my-site = myself] with [identity = "forest"] < forest [
      let to-forest forest - (count patches with [my-site = myself] with [identity = "forest"])
      ask min-n-of to-forest patches with [identity != "settlement"] with [identity != "crops"] with
[identity != "pastures"] with [identity != "river"] [distance myself]

        [set pcolor lime - 2
          set my-site myself
        ]
    ]
  end

to load-DTM
  gis:load-coordinate-system "DTM.prj"

  set elevation gis:load-dataset "DTM.asc"
  gis:set-world-envelope-ds gis:envelope-of elevation
  gis:apply-raster elevation altitude
  file-close

  ask patches [
    set altitude precision altitude 1
    set pcolor scale-color grey altitude 0 30
    set DTMcol pcolor ]
  end

to load-soil-map
  set textures gis:load-dataset "TEXTURES_numeriche.asc"
  gis:set-world-envelope-ds gis:envelope-of textures
  gis:apply-raster textures soil-texture
  file-close
end

to set-soil-parameters

```

ask patches with [soil-texture = 0][set soil-texture [soil-texture] of min-one-of patches with [soil-texture != 0] [distance myself]]

ask patches with [soil-texture = 1][

set soil-texture "franco"

set soil-weight 1.32

set wilting-point 11.52

set field-capacity 24.42

set saturation-point 0.47]

ask patches with [soil-texture = 2][

set soil-texture "franco-argillosa"

set soil-weight 1.27

set wilting-point 13.68

set field-capacity 28.61

set saturation-point 0.5]

ask patches with [soil-texture = 3][

set soil-texture "franco-limosa"

set soil-weight 1.24

set wilting-point 14.48

set field-capacity 30.39

set saturation-point 0.47]

ask patches with [soil-texture = 4][

set soil-texture "franco-limoso-argillosa"

set soil-weight 1.19

set wilting-point 16.96

set field-capacity 35.17

set saturation-point 0.52]

ask patches with [soil-texture = 5][

set soil-texture "franco-sabbiosa"

set soil-weight 1.44

set wilting-point 6.92

set field-capacity 15.29

set saturation-point 0.41]

ask patches with [soil-texture = 6][

set soil-texture "argilloso-limosa"

set soil-weight 1.15

set wilting-point 18.63

set field-capacity 38.4

set saturation-point 0.54]

ask patches with [soil-texture = 7][

set soil-texture "argillosa"

set soil-weight 1.17

set wilting-point 18.44

set field-capacity 37.81

set saturation-point 0.56]

ask patches with [soil-texture = 8][

set soil-texture "sabbiosa"

set soil-weight 1.51

set wilting-point 3.74

set field-capacity 8.98

```

set saturation-point 0.36 ]

set fringes table:make
table:put fringes "franco" 0.375
table:put fringes "franco-argillosa" 0.469
table:put fringes "franco-limosa" 0.682
table:put fringes "franco-limoso-argillosa" 1.339
table:put fringes "franco-sabbiosa" 0.25
table:put fringes "argilloso-limosa" 1.92
table:put fringes "argillosa" 0.815
table:put fringes "sabbiosa" 0.1

ask patches [
  set my-soil-weight soil-weight * 1000
  set-real-soil-parameters ]

end

to set-real-soil-parameters
  set my-wilting-point wilting-point * my-soil-weight / 100
  set my-field-capacity field-capacity * my-soil-weight / 100
  set my-saturation-point saturation-point * my-soil-weight
end

to load-season-maps

gis:load-coordinate-system "BIO_19.prj"

set BIO_MeanSPRING gis:load-dataset "BIO_TS_new.asc"
gis:set-world-envelope-ds gis:envelope-of BIO_MeanSPRING

```

```
gis:apply-raster BIO_MeanSPRING MeanSPRING
```

```
file-close
```

```
set BIO_MaxSP gis:load-dataset "BIO_MaxSP.asc"
```

```
gis:set-world-envelope-ds gis:envelope-of BIO_MaxSP
```

```
gis:apply-raster BIO_MaxSP MaxSP
```

```
file-close
```

```
set BIO_MinSP gis:load-dataset "BIO_MinSP.asc"
```

```
gis:set-world-envelope-ds gis:envelope-of BIO_MinSP
```

```
gis:apply-raster BIO_MinSP MinSP
```

```
file-close
```

```
set BIO_prec_SP gis:load-dataset "BIO_16.asc"
```

```
gis:set-world-envelope-ds gis:envelope-of BIO_prec_SP
```

```
gis:apply-raster BIO_prec_SP SPRING-precipitations
```

```
file-close
```

```
set BIO_MeanSUMMER gis:load-dataset "BIO_10.asc"
```

```
gis:set-world-envelope-ds gis:envelope-of BIO_MeanSUMMER
```

```
gis:apply-raster BIO_MeanSUMMER MeanSUMMER
```

```
file-close
```

```
set BIO_MaxSU gis:load-dataset "BIO_5.asc"
```

```
gis:set-world-envelope-ds gis:envelope-of BIO_MaxSU
```

```
gis:apply-raster BIO_MaxSU MaxSU
```

```
file-close
```

```
set BIO_MinSU gis:load-dataset "BIO_MinSU.asc"
```

```
gis:set-world-envelope-ds gis:envelope-of BIO_MinSU
```

```
gis:apply-raster BIO_MinSU MinSU
```


file-close

```
set BIO_prec_SU gis:load-dataset "BIO_18.asc"
gis:set-world-envelope-ds gis:envelope-of BIO_prec_SU
gis:apply-raster BIO_prec_SU SUMMER-precipitations
file-close
```

```
set BIO_MeanAUTUMN gis:load-dataset "BIO_8.asc"
gis:set-world-envelope-ds gis:envelope-of BIO_MeanAUTUMN
gis:apply-raster BIO_MeanAUTUMN MeanAUTUMN
file-close
```

```
set BIO_MaxA gis:load-dataset "BIO_MaxA.asc"
gis:set-world-envelope-ds gis:envelope-of BIO_MaxA
gis:apply-raster BIO_MaxA MaxA
file-close
```

```
set BIO_MinA gis:load-dataset "BIO_MinA.asc"
gis:set-world-envelope-ds gis:envelope-of BIO_MinA
gis:apply-raster BIO_MinA MinA
file-close
```

```
set BIO_prec_A gis:load-dataset "BIO_16.asc"
gis:set-world-envelope-ds gis:envelope-of BIO_prec_A
gis:apply-raster BIO_prec_A AUTUMN-precipitations
file-close
```

```
set BIO_MeanWINTER gis:load-dataset "BIO_11.asc"
gis:set-world-envelope-ds gis:envelope-of BIO_MeanWINTER
gis:apply-raster BIO_MeanWINTER MeanWINTER
```

file-close

set BIO_MaxW gis:load-dataset "BIO_MaxW.asc"

gis:set-world-envelope-ds gis:envelope-of BIO_MaxW

gis:apply-raster BIO_MaxW MaxW

file-close

set BIO_MinW gis:load-dataset "BIO_6.asc"

gis:set-world-envelope-ds gis:envelope-of BIO_MinW

gis:apply-raster BIO_MinW MinW

file-close

set BIO_prec_W gis:load-dataset "BIO_19.asc"

gis:set-world-envelope-ds gis:envelope-of BIO_prec_W

gis:apply-raster BIO_prec_W WINTER-precipitations

file-close

end

to set-patch-climate

ask patches [

set MeanSPRING precision (MeanSPRING / 10) 2

set MaxSP precision (MaxSP / 10) 2

set MinSP precision (MinSP / 10) 2

set MeanSUMMER precision (MeanSUMMER / 10) 2

set MaxSU precision (MaxSU / 10) 2

set MinSU precision (MinSU / 10) 2

set MeanAUTUMN precision (MeanAUTUMN / 10) 2

set MaxA precision (MaxA / 10) 2

set MinA precision (MinA / 10) 2

set MeanWINTER precision (MeanWINTER / 10) 2

set MaxW precision (MaxW / 10) 2

set MinW precision (MinW / 10) 2

]

ask one-of patches with-min [MeanSPRING] [

ask other patches [

set MeanSPRING-increase MeanSPRING - [MeanSPRING] of myself]

ask one-of patches with-min [MaxSP] [

ask other patches [

set MaxSP-increase MaxSP - [MaxSP] of myself]

ask one-of patches with-min [MinSP] [

ask other patches [

set MinSP-increase MinSP - [MinSP] of myself]

ask one-of patches with-min [SPRING-precipitations] [

ask other patches [

set SPRING-precipitations-increase SPRING-precipitations - [SPRING-precipitations] of myself]

ask one-of patches with-min [MeanSUMMER] [

ask other patches [

set MeanSUMMER-increase MeanSUMMER - [MeanSUMMER] of myself]

ask one-of patches with-min [MaxSU] [

ask other patches [

set MaxSU-increase MaxSU - [MaxSU] of myself]

ask one-of patches with-min [MinSU] [

ask other patches [

set MinSU-increase MinSU - [MinSU] of myself]

ask one-of patches with-min [SUMMER-precipitations] [

ask other patches [

set SUMMER-precipitations-increase SUMMER-precipitations - [SUMMER-precipitations] of myself
]

ask one-of patches with-min [MeanAUTUMN] [

ask other patches [

set MeanAUTUMN-increase MeanAUTUMN - [MeanAUTUMN] of myself]

ask one-of patches with-min [MaxA] [

ask other patches [

set MaxA-increase MaxA - [MaxA] of myself]

ask one-of patches with-min [MinA] [

ask other patches [

set MinA-increase MinA - [MinA] of myself]

ask one-of patches with-min [AUTUMN-precipitations] [

ask other patches [

set AUTUMN-precipitations-increase AUTUMN-precipitations - [AUTUMN-precipitations] of myself
]

ask one-of patches with-min [MeanWINTER] [

ask other patches [

set MeanWINTER-increase MeanWINTER - [MeanWINTER] of myself]

ask one-of patches with-min [MaxW] [

ask other patches [

set MaxW-increase MaxW - [MaxW] of myself]

ask one-of patches with-min [MinW] [

ask other patches [

set MinW-increase MinW - [MinW] of myself]

ask one-of patches with-min [SPRING-precipitations] [

ask other patches [

set WINTER-precipitations-increase WINTER-precipitations - [WINTER-precipitations] of myself]

set watertable-oscillation table:make

table:put watertable-oscillation (0) (10)

table:put watertable-oscillation (1) (7.5)

table:put watertable-oscillation (2) (5)

table:put watertable-oscillation (3) (2.5)

table:put watertable-oscillation (4) (- 2.5)

table:put watertable-oscillation (5) (- 5)

table:put watertable-oscillation (6) (- 7.5)

table:put watertable-oscillation (7) (- 10)

set season "summer"

```

end

to set-new-season

  ifelse season = "spring"
  [set-summer-season]
  [ifelse season = "summer"
  [set-autumn-season]
  [ifelse season = "winter"
  [set-spring-season]
  [set-winter-season] ] ]

  if drought [
    ask patches [set precipitations precipitations * drought-coefficient]]

  if extra-rainfall [
    ask patches [set precipitations precipitations * extra-rainfall-coefficient]]

  let reference-precipitations-stdev (reference-precipitations * 0.98) / 3
  let mean-precipitations mean [precipitations] of patches

  if mean-precipitations < reference-precipitations-stdev [
    set watertable watertable + table:get watertable-oscillation 0]

  if mean-precipitations >= reference-precipitations-stdev and mean-precipitations < (reference-precipitations-stdev * 2)[
    set watertable watertable + table:get watertable-oscillation 1]

  if mean-precipitations >= (reference-precipitations-stdev * 2) and mean-precipitations < (reference-precipitations-stdev * 3)[
    set watertable watertable + table:get watertable-oscillation 2]

  if mean-precipitations >= (reference-precipitations-stdev * 3) and mean-precipitations < (reference-precipitations-stdev * 4)[

```

```

    set watertable watertable + table:get watertable-oscillation 3]

    if mean-precipitations >= (reference-precipitations-stdev * 4) and mean-precipitations <
    (reference-precipitations-stdev * 5)[

        set watertable watertable + table:get watertable-oscillation 4]

    if mean-precipitations >= (reference-precipitations-stdev * 5) and mean-precipitations <
    (reference-precipitations-stdev * 6)[

        set watertable watertable + table:get watertable-oscillation 5]

    if mean-precipitations >= (reference-precipitations-stdev * 6) and mean-precipitations <
    (reference-precipitations-stdev * 7)[

        set watertable watertable + table:get watertable-oscillation 6]

    if mean-precipitations >= (reference-precipitations-stdev * 7)[

        set watertable watertable + table:get watertable-oscillation 7]

    ]

    if watertable <= 20 [set watertable 60] ; do un margine di sicurezza

end

to load-rivers

    gis:load-coordinate-system "IDRO.prj"
    set river-dataset gis:load-dataset "IDRO.shp"
    gis:set-world-envelope gis:envelope-of river-dataset

    ask patches gis:intersecting river-dataset

    [ set identity "river" set pcolor cyan ]

end

to load-sites

```

```

    gis:load-coordinate-system "SITI_BR_def_2.prj"
    gis:set-world-envelope-ds [656065.7 695753.279 4991475.393161 5007773.759078]

```

```

set dataset gis:load-dataset "SITI_BR_def_2.shp"

display-sites

setup-households

end

to display-sites

foreach gis:feature-list-of dataset [
  vector-feature ->
  create-sites 1 [
    set shape "circle" set size 2

    set xcor gis:property-value vector-feature "Xabm" set ycor gis:property-value vector-feature
    "Yabm"

    set name gis:property-value vector-feature "NOME"

    set site-area gis:property-value vector-feature "ESTENSIONE" ; e così via per tutti i valori in tabella

    set population round (site-area * initial-population/ha)

    set crops population * 0.5

    set pastures population * 1.5

    set forest population
  ]
]

end

to setup-households

ask sites [

; INIZIALIZZAZIONE HOUSEHOLDS

hatch (population / 6) [set breed households]

set my-households households-here

```



```

ask my-households [
  set my-home myself
; definisco i membri della famiglia

  set family table:make

  table:put family "male-infans-a" 0
  table:put family "female-infans-a" 0
  table:put family "male-infans-b" 0
  table:put family "female-infans-b" 0
  table:put family "male-juvenes" 0
  table:put family "female-juvenes" 0
  table:put family "male-adultus" 0
  table:put family "female-adultus" 0
  table:put family "male-adultus" 0
  table:put family "male-maturus" 0
  table:put family "female-maturus" 0
  table:put family "male-seniles" 0
  table:put family "female-seniles" 0

  set m-family-clock table:make
  set f-family-clock table:make

  let family-length one-of (range 2 9)
  run word "setup-family-" family-length
]; fine ask my-households

  update-local-population
]

ask households [set new-home ""]

end

to update-local-population

```

```

set my-households households-here

ask my-households with [table:values m-family-clock = []] with [table:values m-family-clock = []]
[die]

set tot-female-infans-a sum [table:get family "female-infans-a"] of households-here
set tot-male-infans-a sum [table:get family "male-infans-a"] of households-here
set tot-female-infans-b sum [table:get family "female-infans-b"] of households-here
set tot-male-infans-b sum [table:get family "male-infans-b"] of households-here
set tot-female-juvenes sum [table:get family "female-juvenes"] of households-here
set tot-male-juvenes sum [table:get family "male-juvenes"] of households-here
set tot-female-adultus sum [table:get family "female-adultus"] of households-here
set tot-male-adultus sum [table:get family "male-adultus"] of households-here
set tot-female-maturus sum [table:get family "female-maturus"] of households-here
set tot-male-maturus sum [table:get family "male-maturus"] of households-here
set tot-female-seniles sum [table:get family "female-seniles"] of households-here
set tot-male-seniles sum [table:get family "male-seniles"] of households-here

set infans-a tot-female-infans-a + tot-male-infans-a
set infans-b tot-female-infans-b + tot-male-infans-b
set juvenes tot-female-juvenes + tot-male-juvenes
set adultus tot-female-adultus + tot-male-adultus
set maturus tot-female-maturus + tot-male-maturus
set seniles tot-female-seniles + tot-male-seniles

set population infans-a + infans-b + juvenes + adultus + maturus + seniles
end

to set-site-parameters

set need-of-cereals-per-person 1750 * 90

```

ask sites [

set hunger [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]

set adjustment table:make

table:put adjustment "food" 0

table:put adjustment "metal" 0

table:put adjustment "workers" 0

set gain table:make

table:put gain "food" 0

table:put gain "metal" 0

table:put gain "workers" 0

set loss table:make

table:put loss "food" 0

table:put loss "metal" 0

table:put loss "workers" 0

set necessity table:make

table:put necessity "food" 0

table:put necessity "workers" 0

table:put necessity "metal" 0

set availability table:make

table:put availability "food" 0

table:put availability "workers" 0

table:put availability "metal" 0

set reserve table:make

table:put reserve "food" (population * 1750 * 365) * initial-food-reserve

table:put reserve "workers" 0

table:put reserve "metal" 0

```

    table:put reserve "timber" 0
    set offer table:make
    table:put offer "food" 0
    table:put offer "workers" 0
    table:put offer "metal" 0
    set demand table:make
    table:put demand "food" 0
    table:put demand "workers" 0
    table:put demand "metal" 0

    set old-reserve table:make
]
end
to set-crop-parameters

set crop-energy 3350

set optimum-moistures table:make
table:put optimum-moistures "wheat" 3
table:put optimum-moistures "emmer/spelt" 3
table:put optimum-moistures "barley" 3
table:put optimum-moistures "oat" 3
table:put optimum-moistures "millet" 2

set soil-moistures table:make
table:put soil-moistures "wheat0" 0
table:put soil-moistures "wheat1" 2
table:put soil-moistures "wheat2" 4

```

table:put soil-moistures "wheat3" 5
table:put soil-moistures "wheat4" 3
table:put soil-moistures "wheat5" 1
table:put soil-moistures "wheat6" 0

table:put soil-moistures "emmer/spelt0" 0
table:put soil-moistures "emmer/spelt1" 3
table:put soil-moistures "emmer/spelt2" 4
table:put soil-moistures "emmer/spelt3" 5
table:put soil-moistures "emmer/spelt4" 3
table:put soil-moistures "emmer/spelt5" 2
table:put soil-moistures "emmer/spelt6" 0

table:put soil-moistures "barley0" 0
table:put soil-moistures "barley1" 3
table:put soil-moistures "barley2" 4
table:put soil-moistures "barley3" 5
table:put soil-moistures "barley4" 2
table:put soil-moistures "barley5" 1
table:put soil-moistures "barley6" 0

table:put soil-moistures "oat0" 0
table:put soil-moistures "oat1" 2
table:put soil-moistures "oat2" 4
table:put soil-moistures "oat3" 5
table:put soil-moistures "oat4" 4
table:put soil-moistures "oat5" 2
table:put soil-moistures "oat6" 2

table:put soil-moistures "millet0" 0
table:put soil-moistures "millet1" 3
table:put soil-moistures "millet2" 5
table:put soil-moistures "millet3" 4
table:put soil-moistures "millet4" 1
table:put soil-moistures "millet5" 0
table:put soil-moistures "millet6" 0

set optimum-T table:make
table:put optimum-T "springwheat" 15
table:put optimum-T "springemmer/spelt" 15
table:put optimum-T "springbarley" 15
table:put optimum-T "springoat" 15
table:put optimum-T "springmillet" 25
table:put optimum-T "summerwheat" 18
table:put optimum-T "summeremmer/spelt" 18
table:put optimum-T "summerbarley" 18
table:put optimum-T "summeroat" 18
table:put optimum-T "summermillet" 25
table:put optimum-T "autumnwheat" 11
table:put optimum-T "autumnemmer/spelt" 11
table:put optimum-T "autumnbarley" 11
table:put optimum-T "autumnoat" 7
table:put optimum-T "autumnmillet" 25
table:put optimum-T "winterwheat" 5
table:put optimum-T "winteremmer/spelt" 5
table:put optimum-T "winterbarley" 5

```
table:put optimum-T "winteroat" 5
table:put optimum-T "wintermillet" 25
```

```
set critical-min-T table:make
table:put critical-min-T "wheat" 0.5
table:put critical-min-T "emmer/spelt" 0
table:put critical-min-T "barley" 0.5
table:put critical-min-T "oat" 1.5
table:put critical-min-T "millet" 10
```

```
set critical-max-T table:make
table:put critical-max-T "wheat" 32
table:put critical-max-T "emmer/spelt" 35
table:put critical-max-T "barley" 35
table:put critical-max-T "oat" 35
table:put critical-max-T "millet" 45
```

```
set crop-productions_kg/ha table:make
table:put crop-productions_kg/ha "wheat" wheat-production * 100
table:put crop-productions_kg/ha "emmer/spelt" emmer/spelt-production * 100
table:put crop-productions_kg/ha "barley" barley-production * 100
table:put crop-productions_kg/ha "oat" oat-production * 100
table:put crop-productions_kg/ha "millet" millet-production * 100
```

```
end
```

```
to initialize-soil-moistures
```

```
ask patches [
```

```

set last-year-previous-moisture table:make
set last-year-moistures table:make]

repeat 5 [
  set-new-season
  ask patches [compute-soil-moistures]
  ask patches [
    table:put last-year-previous-moisture season soil-moisture
    table:put last-year-moistures season soil-moisture]]

ask patches [compute-soil-moistures]

end

to setup-patch-fertility

ask patches with [identity != "forest"][
  set soil-fertility one-of (range (max-soil-fertility / 5) max-soil-fertility)
]
ask patches with [identity = "forest"][
  set soil-fertility max-soil-fertility
]
end

to setup-borders

ask patch 92 163 [
  sprout 1 [
    set breed borders
    set shape "star"

```



```

    set size 10

    set color yellow

    set offer-1 "metal"

    set demand-1 "food"
  ]
]

ask patch 400 0 [
  sprout 1 [
    set breed borders

    set shape "star"

    set size 10

    set color orange

    set demand-1 "metal"
  ]
]

set metal-source max-one-of borders [pycor]

set metal-demander min-one-of borders [pycor]

end

to setup-network

ask patches with [remainder pxcor 3 = 0 and remainder pycor 3 = 0] [sprout-nodes 1]

ask nodes [create-connective-links-to min-n-of 8 other nodes [distance myself]]

ask nodes-on patches with [identity = "river"] [set water? true set forest? false set mud? false]

ask nodes-on patches with [identity = "forest"] [set water? false set forest? true set mud? false]

ask nodes-on patches with [identity = "grass" or identity = "crops" or identity = "pastures" or identity = "settlement"] [set water? false set forest? false set mud? false]

ask nodes-on patches with [soil-moisture >= 5] [set water? false set forest? false set mud? true]

setup-weights

```

```
ask nodes [set hidden? true]
ask connective-links [set hidden? true]
ask sites [set my-node min-one-of nodes [distance myself]]
ask borders [set b-node min-one-of nodes [distance myself]]
ask patches [set p-node min-one-of nodes [distance myself]]
```

```
end
```

```
to setup-weights
```

```
ask connective-links [
  let slope% [[altitude] of patch-here] of end1 + [[altitude] of patch-here] of end2
  set slope slope% * 90 / 100]
```

```
ask connective-links with [slope >= 0 and slope < 0.05][
  set slope-coefficient 1]
```

```
ask connective-links with [slope < 0 and abs slope >= 0.05 and abs slope < 0.15][
  set slope-coefficient 0.5]
```

```
ask connective-links with [slope < 0 and abs slope >= 0.15 and abs slope < 0.25][
  set slope-coefficient 0.8]
```

```
ask connective-links with [slope < 0 and abs slope >= 0.25 and abs slope < 0.35][
  set slope-coefficient 1.3]
```

```
ask connective-links with [slope < 0 and abs slope >= 0.35 and abs slope < 0.45][
  set slope-coefficient 1.95]
```

```
ask connective-links with [slope < 0 and abs slope >= 0.45][
  set slope-coefficient 100] ; -> pendenza proibitiva
```

```

ask connective-links with [slope > 0 and slope >= 0.05 and abs slope < 0.15][
  set slope-coefficient 1.85]
ask connective-links with [slope > 0 and slope >= 0.15 and abs slope < 0.25][
  set slope-coefficient 3.95]
ask connective-links with [slope > 0 and slope >= 0.25 and abs slope < 0.35][
  set slope-coefficient 5.9]
ask connective-links with [slope > 0 and slope >= 0.35 and abs slope < 0.45][
  set slope-coefficient 8]
ask connective-links with [slope > 0 and slope >= 0.45][
  set slope-coefficient 100]
update-weights

end

to setup-metal-distance
  ask sites [
    let metal-source-node [b-node] of metal-source

    set my-metal-distance precision [nw:weighted-distance-to metal-source-node "weight"] of my-
node 3
  ]
end

to setup-relational-links
  ask sites [
    create-relational-links-from other sites [set reputation [] set reputation lput [population] of myself
reputation]

    setup-reputation
  ]
end

to setup-reputation

```

```

let food-total-offer sum [table:get offer "food"] of sites + 1
let food-total-demand sum [table:get demand "food"] of sites + 1
let food-temp-value food-total-demand / food-total-offer

let metal-total-offer sum [table:get offer "metal"] of sites + 1
let metal-total-demand sum [table:get demand "metal"] of sites + 1
let metal-temp-value metal-total-demand / metal-total-offer

let workers-total-offer sum [table:get offer "workers"] of sites + 1
let workers-total-demand sum [table:get demand "workers"] of sites + 1
let workers-temp-value workers-total-demand / workers-total-offer

```

```

ask sites [set exchange-potential

```

```

  (table:get availability "food" * food-temp-value) +
  (table:get availability "metal" * metal-temp-value) +
  (table:get availability "workers" * workers-temp-value)

```

```

  ask my-in-relational-links [

```

```

    let end-2 end2

```

```

    let distance-end1-end2 [nw:weighted-distance-to [my-node] of end-2 "weight"] of [my-node] of
end1

```

```

    set reputation [exchange-potential] of end1 / distance-end1-end2]

```

```

  ]

```

```

let reputation-unit standard-deviation [reputation] of relational-links

```

```

ask sites [ask my-in-relational-links [

```

```

  ifelse reputation-unit > 0

```

```

    [let first-reputation int reputation / reputation-unit

```

```

    set reputation []

```

```

    set reputation lput first-reputation reputation]

```

```

  [set reputation [0]]]

```

```

]
end
;-----PROCEDURA GO-----
to go

    set-new-season
    produce
    update-weights
    update-and-exchange
    consume
    update-population
    update-sites
    if count sites <= survivors [stop]

    tick

end
;.....processi di produzione.....
to produce
    plan-production
    choose-crop-type
    assign-workers
    compute-and-register-soil-moistures
    compute-productivity
    produce-agriculture
    update-fertility-and-charge
end
to plan-production

```

```

if ticks = 0 [ask patches [ifelse identity != "forest" [set charge one-of [1 2 3]] [set charge 3]]]
foreach sort-on [count my-patches] sites
[the-site -> ask the-site [
  if season = "autumn" [
    update-crops-and-pastures
    update-forest ]
  ]]
end
to choose-crop-type

```

```

ask patches with [identity = "crops"]with [crop-type = 0][
  set productivity []
  set season-productivity []
  estimate-soil-moisture
  if season = "autumn" [
    choose-microtherm-crop-type]
  if season = "spring" or season = "summer" [
    choose-macrotherm-crop-type]
  ]
end

```

to estimate-soil-moisture ; AMPBV 7

```

ifelse table:get last-year-previous-moisture season = 0
[set estimated-soil-moisture 0]
[set estimated-soil-moisture previous-moisture * table:get last-year-moistures season / table:get
last-year-previous-moisture season]
end
to assign-workers

```

ask sites [

let my-workers adultus + maturus + (juvenes / 2) / 2

let crop-workers my-workers + table:get reserve "workers"

table:put reserve "workers" 0

let best-crop-maintenance count crops * crop-maintenance

ifelse crop-workers >= best-crop-maintenance

[ask crops [

set workers-here 4

set season-productivity lput 5 season-productivity]]

[ask crops [

set workers-here round [crop-workers / count crops] of my-site

let maintenance-productivity round ([crop-workers] of my-site * 5 / best-crop-maintenance)

set season-productivity lput maintenance-productivity season-productivity]]

ifelse my-workers >= best-crop-maintenance

[table:put availability "workers" my-workers - best-crop-maintenance

table:put reserve "workers" table:get availability "workers"

table:put necessity "workers" 0]

[table:put necessity "workers" best-crop-maintenance - crop-workers

table:put availability "workers" 0]

]

```

end

to compute-and-register-soil-moistures

ask patches [

table:put last-year-previous-moisture season soil-moisture
table:put last-year-moistures season soil-moisture
set previous-moisture soil-moisture
compute-soil-moistures
]

update-mudness

end

to compute-soil-moistures

set evapotranspiration  $R0 * 0.0023 * (MeanT + 17.8) * (MaxT - MinT)$ 
let daily-precipitations precipitations / 90
let saturated-thickness 1 - watertable
let fringe-level watertable - table:get fringes soil-texture
let capillary-fringe-thickness 1 - fringe-level
let fringe-water  $(capillary-fringe-thickness / 2 * my-saturation-point) + (capillary-fringe-thickness / 2 * my-field-capacity)$ 
let saturation-zone-water saturated-thickness * my-saturation-point

ifelse precipitations >= my-field-capacity
[set soil-water my-field-capacity - my-wilting-point]
[set soil-water precipitations - my-wilting-point]

```



```

ifelse watertable < 1

[set soil-water soil-water + saturation-zone-water + fringe-water]

[if fringe-level < 1 [
  set soil-water soil-water + fringe-water] ]

ifelse soil-water <= evapotranspiration

[ifelse soil-water = evapotranspiration

[set soil-moisture 3]

[ifelse soil-water >= ((evapotranspiration / 3) * 2)

[set soil-moisture 3]

[ifelse soil-water >= (evapotranspiration / 3)

[set soil-moisture 2]

[ifelse soil-water > 0

[set soil-moisture 1]

[set soil-moisture 0]]]]]

[ifelse soil-water <= evapotranspiration + (my-saturation-point - evapotranspiration / 3)

[set soil-moisture 3]

[ifelse soil-water <= evapotranspiration + ((my-saturation-point - evapotranspiration / 3) * 2)

[set soil-moisture 4]

[ifelse soil-water < my-saturation-point

[set soil-moisture 5]

[set soil-moisture 6]]]]]

end

to compute-productivity

ask patches with [identity = "crops"] with [crop-type != 0][

ifelse workers-here >= crop-maintenance

```

```

[set season-productivity lput 6 season-productivity] ;

[set season-productivity lput int ((workers-here * 6) / crop-maintenance) season-productivity]

if not member? 0 season-productivity [
  ifelse soil-fertility <= 0
    [set season-productivity lput one-of [1 0] season-productivity]
    [set season-productivity lput round (6 * soil-fertility / max-soil-fertility) season-productivity]
    if crop-type = "emmer/spelt" or crop-type = "barley" or crop-type = "millet" [
      if round (mean season-productivity) < 6 [set season-productivity lput (last season-productivity +
1) but-last season-productivity]
    ] ]
if not member? 0 season-productivity [
ifelse MeanT < table:get critical-min-T crop-type or MeanT > table:get critical-max-T crop-type
  [set season-productivity lput 0 season-productivity]
  [let my-optimum-T table:get optimum-T word season crop-type
    ifelse MeanT >= my-optimum-T
      [set season-productivity lput (MeanT - my-optimum-T / (table:get critical-max-T crop-type - my-
optimum-T / 5)) season-productivity]
      [set season-productivity lput abs ((my-optimum-T - meanT) / (table:get critical-min-T crop-type -
my-optimum-T / 5)) season-productivity] ]
  ]
if not member? 0 season-productivity [
  set season-productivity lput (table:get soil-moistures word crop-type soil-moisture) season-
productivity
  if last season-productivity = 0 [
    set season-productivity lput 0 but-last season-productivity
  ]
]
ifelse member? 0 season-productivity
  [ask my-site [set last-year-production lput 0 last-year-production]

```

```

set season-productivity []
set productivity []
set crop-type 0
;become-grass ; AMPBV 18
]
[set productivity lput int (mean season-productivity) productivity
set season-productivity []
]
]
update-fertility-and-charge

ask sites [
  if any? crops with [crop-type = 0] with [workers-here > 0] [
    ifelse table:get demand "workers" = 0
      [table:put offer "workers" table:get offer "workers" + sum [workers-here] of crops with [crop-type
= 0]
      ask crops with [crop-type = 0] [set workers-here 0] ]

    [table:put demand "workers" table:get demand "workers" - sum [workers-here] of crops with
[crop-type = 0]
    ask crops with [crop-type = 0] [set workers-here 0]
    if table:get demand "workers" < 0 [
      table:put offer "workers" abs table:get demand "workers"
      table:put demand "workers" 0]]
  ] ]
end

to produce-agriculture
  ask sites [
    ask crops with [crop-type = "oat" and length productivity = 3] [harvest]

```

```
ask crops with [crop-type = "wheat" or crop-type = "barley" or crop-type = "emmer/spelt"] with
[length productivity = 4] [harvest]
```

```
ask crops with [crop-type = "millet"] [harvest]
```

```
table:put reserve "food" (table:get reserve "food"* 0.8) + (sum [production] of crops * 0.7)
```

```
ask patches with [production > 0][set production 0]
```

```
update-my-patches]
```

```
end
```

```
;.....processi di scambio.....
```

```
to update-and-exchange
```

```
ask relational-links [
```

```
  ifelse length reputation = 12
```

```
    [set reputation lput 0 but-first reputation]
```

```
    [set reputation lput 0 reputation]
```

```
  ]
```

```
if count sites > 1 [
```

```
  update-offer-and-demand
```

```
  if count sites with [reduce + table:values demand > 0] with [reduce + table:values offer > 0] > 1 [
```

```
    ask sites [update-priorities]
```

```
    let sorted-sites sort-on [count site-area] sites
```

```
    foreach sorted-sites [the-site -> ask the-site [
```

```
      choose-partner
```

```
      if partner != 0 and partner != nobody [
```

```
        ask partner [set partner myself]
```

```
        exchange ] ]
```

```
  ] ]]
```

end

to update-offer-and-demand

ask sites [

table:put gain "food" 0

table:put gain "metal" 0

table:put gain "workers" 0

table:put loss "food" 0

table:put loss "metal" 0

table:put loss "workers" 0]

update-food-offer-and-demand

update-workers-offer-and-demand

update-metal-offer-and-demand

end

to update-priorities

let demands table:to-list demand

let sorted-demands sort-by [[list1 list2] -> item 1 list1 > item 1 list2] demands

set demand table:from-list sorted-demands

set priority-1 first table:keys demand

set priority-2 item 1 table:keys demand

let offer-2 table:get demand priority-2 - table:get offer priority-2

set priority-3 item 2 table:keys demand

end

to choose-partner

let exchanging-sites sites with [reduce + table:values demand > 0] with [reduce + table:values offer > 0]

let rel-links sort-on [thickness] my-out-relational-links

foreach rel-links [x -> ask x [

ask end2 [set exchange-distance [nw:weighted-distance-to [my-node] of [end1] of x"weight"] of [my-node] of [end2] of x]

]]

If table:get offer priority-2 > table:get demand priority-2 [

if any? other exchanging-sites with [table:get offer [priority-1] of myself > 0] with [table:get demand [priority-3] of myself > 0 or table:get demand [priority-2] of myself > 0] [

set partner max-one-of other exchanging-sites [(table:get offer [priority-1] of myself - [table:get demand priority-1] of myself) +

([table:get offer [priority-2] of myself] of self - [table:get demand priority-2] of myself) +

([table:get offer [priority-3] of myself] of self - [table:get demand priority-3] of myself) *

(1 + [mean reputation] of in-relational-link-from myself / exchange-distance)]

]]

If table:get demand priority-2 > table:get offer priority-2 [

if any? other exchanging-sites with [table:get offer [priority-1] of myself > 0 or table:get offer [priority-2] of myself > 0] with [table:get demand [priority-3] of myself > 0] [

set partner max-one-of other exchanging-sites [(table:get offer [priority-1] of myself - [table:get demand priority-1] of myself) +

(table:get offer [priority-2] of myself - [table:get demand priority-2] of myself) +

([table:get offer [priority-3] of myself] of self - [table:get demand priority-3] of myself) /

(1 + [mean reputation] of in-relational-link-from myself / exchange-distance)]

]]

```

ask sites [set exchange-distance 0]

end

to exchange

if table:get availability "food" + [table:get availability "food"] of partner > 0 [
    table:put adjustment "food" (table:get necessity "food" + table:get reserve "food") + ([table:get
necessity "food" + table:get reserve "food"] of partner) /
    (table:get availability "food" + [table:get availability "food"] of partner)
    ask partner [table:put adjustment "food" [table:get adjustment "food"] of myself]]

if table:get availability "metal" + [table:get availability "metal"] of partner > 0 [
    table:put adjustment "metal" (table:get necessity "metal" + table:get reserve "metal") + ([table:get
necessity "metal" + table:get reserve "metal"] of partner) /
    (table:get availability "metal" + [table:get availability "metal"] of partner)
    ask partner [table:put adjustment "metal" [table:get adjustment "metal"] of myself]]

if table:get availability "workers" + [table:get availability "workers"] of partner > 0 [
    table:put adjustment "workers" (table:get necessity "workers" + table:get reserve "workers") +
([table:get necessity "workers" + table:get reserve "workers"] of partner) /
    (table:get availability "workers" + [table:get availability "workers"] of partner)
    ask partner [table:put adjustment "workers" [table:get adjustment "workers"] of myself]]

ifelse table:get availability [priority-1] of partner > 0 and [table:get availability [priority-1] of myself]
of partner > 0
    [exchange-1]

    [ifelse table:get availability [priority-1] of partner > 0 and [table:get availability [priority-2] of
myself] of partner > 0
        [exchange-1-2]

        [ifelse table:get availability [priority-2] of partner > 0 and [table:get availability [priority-2] of
myself] of partner > 0
            [exchange-2]

```

[ifelse table:get availability [priority-2] of partner > 0 and [table:get availability [priority-1] of myself] of partner > 0

[exchange-2-1]

[ifelse table:get availability [priority-1] of partner > 0 and [table:get availability [priority-3] of myself] of partner > 0

[exchange-1-3]

[ifelse table:get availability [priority-2] of partner > 0 and [table:get availability [priority-3] of myself] of partner > 0

[exchange-2-3]

[ifelse table:get availability [priority-3] of partner > 0 and [table:get availability [priority-3] of myself] of partner > 0

[exchange-3]

[ifelse table:get availability [priority-3] of partner > 0 and [table:get availability [priority-2] of myself] of partner > 0

[exchange-3-2]

[if table:get availability [priority-3] of partner > 0 and [table:get availability [priority-1] of myself] of partner > 0

[exchange-3-1]]

]]]]]]]

ask partner [

update-reputation

update-offer-and-demand

table:put adjustment "food" 0

table:put adjustment "metal" 0

table:put adjustment "workers" 0

set partner 0]

update-reputation

table:put adjustment "food" 0

table:put adjustment "metal" 0


```

table:put adjustment "workers" 0
update-offer-and-demand
set partner 0

end

;.....processi di consumo.....

to consume
  ask sites [
    consume-food
    consume-forest]
end

to consume-food

  let need-of-cereals population * 1750 * 90
  ifelse table:get reserve "food" >= need-of-cereals
  [table:put reserve "food" table:get reserve "food" - need-of-cereals
    set hunger lput 0 hunger
    set hunger remove-item 0 hunger]
  [let missing-cereals need-of-cereals - table:get reserve "food"
    table:put reserve "food" 0
    set hunger lput round (missing-cereals / need-of-cereals-per-person) hunger
    set hunger remove-item 0 hunger]
end

to consume-forest

  if season = "summer" [set need-of-forest firewood * 0.05 * count my-households]
  if season = "spring" [set need-of-forest firewood * 0.06 * count my-households]
  if season = "autumn" [set need-of-forest firewood * 0.08 * count my-households]

```

```

if season = "winter" [set need-of-forest firewood * count my-households]

set need-of-forest int (need-of-forest + (random-poisson 5 / 10))

ifelse need-of-forest <= count forest * 0.5

[ask n-of need-of-forest forest [become-grass]
  set forest my-patches with [identity = "forest"]]

[ask forest [become-grass]          ;]
  set my-farthest-patch max-one-of patches with [my-site = myself] [distance myself]
let potential-new-forest patches in-radius ([distance myself] of my-farthest-patch + 1)
with [identity = "forest"]
with [my-site = 0]
if any? potential-new-forest [
  ifelse count potential-new-forest >= round need-of-forest
    [ask n-of round need-of-forest potential-new-forest [set my-site myself]]
    [ask potential-new-forest [set my-site myself]] ]
]
update-my-patches
end
;.....processi demografici.....
to update-population

ask sites [

if nutrition-factor [
  ifelse last hunger = 0

```

```

[ifelse seasonal-reserve >= (1750 * population * 90) / 2
  [ask households-here [set full-nutrition-benefit 0.5] ]
  [ask households-here [set full-nutrition-benefit [seasonal-reserve] of my-home / (1750 *
[population] of my-home * 90)]]]
[ask households-here [set full-nutrition-benefit 0]]
]

```

```

if hunger-factor [
  ifelse last hunger = 0
    [set hunger-effect-coefficient 1]
    [set hunger-effect-coefficient last hunger / population] ] ]
age
update-deceases
update-births
ask households with [reduce + table:values family <= 0] [die]
manage-marriages

end
to age

```

```

ask sites [
  ask households-here [

    foreach table:keys m-family-clock [x ->
      table:put m-family-clock x table:get m-family-clock x + 0.25]

    foreach table:keys f-family-clock [x ->
      table:put f-family-clock x table:get f-family-clock x + 0.25]
  ]
]

```

```

if member? 6 table:values m-family-clock [
  table:put family "male-infans-a" table:get family "male-infans-a" - 1
  table:put family "male-infans-b" table:get family "male-infans-b" + 1
]

if member? 6 table:values f-family-clock [
  table:put family "female-infans-a" table:get family "female-infans-a" - 1
  table:put family "female-infans-b" table:get family "female-infans-b" + 1
]


if member? 12 table:values m-family-clock [
  table:put family "male-infans-b" table:get family "male-infans-b" - 1
  table:put family "male-juvenes" table:get family "male-juvenes" + 1
]

if member? 12 table:values f-family-clock [
  table:put family "female-infans-b" table:get family "female-infans-b" - 1
  table:put family "female-juvenes" table:get family "female-juvenes" + 1
]


if member? 20 table:values m-family-clock [
  table:put family "male-juvenes" table:get family "male-juvenes" - 1
  table:put family "male-adultus" table:get family "male-adultus" + 1
]

if member? 20 table:values f-family-clock [
  table:put family "female-juvenes" table:get family "female-juvenes" - 1
  table:put family "female-adultus" table:get family "female-adultus" + 1
]


if member? 40 table:values m-family-clock [

```

```

    table:put family "male-adultus" table:get family "male-adultus" - 1
    table:put family "male-maturus" table:get family "male-maturus" + 1
]
if member? 40 table:values f-family-clock [
    table:put family "female-adultus" table:get family "female-adultus" - 1
    table:put family "female-maturus" table:get family "female-maturus" + 1
]

if member? 60 table:values m-family-clock [
    table:put family "male-maturus" table:get family "male-maturus" - 1
    table:put family "male-seniles" table:get family "male-seniles" + 1
]
if member? 60 table:values f-family-clock [
    table:put family "female-maturus" table:get family "female-maturus" - 1
    table:put family "female-seniles" table:get family "female-seniles" + 1
]

if member? 80 table:values m-family-clock [
    table:put family "male-seniles" table:get family "male-seniles" - 1
    table:remove m-family-clock item (position 80 table:values m-family-clock) table:keys m-family-clock
]
if member? 80 table:values f-family-clock [
    table:put family "female-seniles" table:get family "female-seniles" - 1
    table:remove f-family-clock item (position 80 table:values f-family-clock) table:keys f-family-clock
]]]
end
to update-deceases

```

```

ask sites [
  update-infans-a-deceases
  update-infans-b-deceases
  update-juvenes-deceases
  update-adultus-deceases
  update-maturus-deceases
  update-seniles-deceases

  if population > 0 [compute-death-rate]
]
end

to update-births

  ask sites [
    let birth-rate death-rate * (population-increase / hunger-effect-coefficient) / 100
    let newborns round birth-rate * population

    let fertiles-households households-here with [table:get family "female-adultus" > 0]
    if any? fertiles-households [
      ask fertiles-households [
        repeat table:get family "female-adultus" [
          let birth-probability newborns / sum [table:get family "female-adultus"] of fertiles-households *
          1000
          let birth-chance random 1000
          if birth-chance <= birth-probability [generate-a-child] ]
        ]
      ]
    update-local-population
  ]
end

```

to manage-marriages

ask sites [

if any? my-households with [table:get family "female-adultus" > 1] and any? my-households with [table:get family "male-adultus" > 1] [

let bride-household one-of households-here with [table:get family "female-adultus" > 1]

let groom-household one-of households-here with [table:get family "male-adultus" > 1]

ask bride-household [

table:put family "female-adultus" table:get family "female-adultus" - 1

let bride-age min filter [x -> x >= 20 and x < 40] table:values f-family-clock

table:remove f-family-clock item (position bride-age table:values f-family-clock) table:keys f-family-clock

ask groom-household [

table:put family "male-adultus" table:get family "male-adultus" - 1

let groom-age min filter [x -> x >= 20 and x < 40] table:values m-family-clock

table:remove m-family-clock item (position groom-age table:values m-family-clock) table:keys m-family-clock

hatch 1 [

table:clear family

table:put family "male-infans-a" 0

table:put family "female-infans-a" 0

table:put family "male-infans-b" 0

table:put family "female-infans-b" 0

table:put family "male-juvenes" 0

table:put family "female-juvenes" 0

```

    table:put family "male-adultus" 1
    table:put family "female-adultus" 1
    table:put family "male-maturus" 0
    table:put family "female-maturus" 0
    table:put family "male-seniles" 0
    table:put family "female-seniles" 0
    table:clear m-family-clock
    table:put m-family-clock 1 groom-age
    table:clear f-family-clock
    table:put f-family-clock 1 bride-age
    set new-home ""
  ]]]]
end
to update-sites

ask sites [check-population]

let hungered-sites sites with [length filter [h -> h > 0] hunger > hunger-threshold]
ask hungered-sites [
  let hungered-households int (min filter [h -> h > 0] hunger / 6 )
  ifelse hungered-households < count households-here
    [ask n-of hungered-households households-here [set new-home word new-home "?"]]
    [ask households-here [set new-home word new-home "?"]]
]

set migrant-households households with [member? "?" new-home]

if any? migrant-households [

```



```

set better-places sites with [last hunger = 0]

ifelse migration = "migrate to welthier sites"

[set better-places sites with [mean hunger > mean [mean hunger] of sites]]

[ifelse migration = "migrate to self-sufficient sites"

[set better-places sites with [length filter [h -> h > 0] hunger < hunger-threshold]]

[set better-places sites with [seasonal-reserve > need-of-cereals-per-person * population]]]

if any? better-places [

  let sorted-better-places sort-on [seasonal-reserve - need-of-cereals-per-person * population]
  better-places

    foreach sorted-better-places [S -> ask S [

      ifelse migration = "migrate to welthier sites"

        [set migration-capacity round (population * 2 / 100)]

        [ifelse migration = "migrate to self-sufficient sites"

          [set migration-capacity round (population * 10 / 100)]

          [set migration-capacity round ((seasonal-reserve - need-of-cereals-per-person) * population) /
6]]

        let potential-immigrants migrant-households with [min-one-of better-places [distance self] =
myself]

        ifelse count potential-immigrants >= migration-capacity

          [let immigrants min-n-of migration-capacity migrant-households [distance myself]

            ask immigrants [

              set new-home myself

              migrate]

          set migrant-households migrant-households with [member? "?" new-home]

        ]

        [ask migrant-households [

          set new-home myself

          migrate]

```

]]]]

```
ask migrant-households [  
  ifelse my-home = 0 or my-home = nobody  
    [if length new-home > homeless-threshold [die]]  
    [ifelse [length filter [h -> h > 0] hunger] of my-home < hunger-threshold-2  
      [set new-home ""]  
      [move-to one-of patches with [my-site = 0]  
        ask my-home [set my-households households-here]  
        set my-home 0] ] ]
```

```
set migrant-households households with [member? "?" new-home]  
]
```

end

;_____SOTTOPROCESSI_____

to setup-family-2

table:put family "female-adultus" 1

table:put f-family-clock 1 one-of (range 21 30)

table:put family "male-adultus" 1

table:put m-family-clock 1 one-of (range 21 30)

end

to setup-family-3

table:put family "female-adultus" 1

table:put f-family-clock 1 one-of (range 21 30)

table:put family "male-adultus" 1

table:put m-family-clock 1 one-of (range 21 30)

setup-children

end

```

to setup-family-4
  table:put family "female-adultus" 1
    table:put f-family-clock 1 one-of (range 21 35)
  table:put family "male-adultus" 1
    table:put m-family-clock 1 one-of (range 21 35)
  repeat 2 [setup-children]
end

to setup-family-5
  table:put family "female-adultus" 1
    table:put f-family-clock 1 one-of (range 21 39)
  table:put family "male-adultus" 1
    table:put m-family-clock 1 one-of (range 21 39)
  repeat 2 [setup-children]
  setup-older-children
end

to setup-family-6
  table:put family "female-adultus" 1
    table:put f-family-clock 1 one-of (range 25 39)
  table:put family "male-adultus" 1
    table:put m-family-clock 1 one-of (range 25 39)
  repeat 2 [setup-children]
  repeat 2 [setup-older-children]
end

to setup-family-7
  table:put family "female-adultus" 1
    table:put f-family-clock 1 one-of (range 25 39)
  table:put family "male-adultus" 1
    table:put m-family-clock 1 one-of (range 25 39)

```

```

repeat 2 [setup-children]
setup-older-children
setup-juvenes-or-maturus
end

to setup-family-8
table:put family "female-adultus" 1
    table:put f-family-clock 1 one-of (range 25 39)
table:put family "male-adultus" 1
    table:put m-family-clock 1 one-of (range 25 39)
ifelse reduce + table:values f-family-clock + reduce + table:values m-family-clock / 2 <= 30
    [repeat 2 [setup-children]
    setup-older-children
    repeat 2 [setup-juvenes-or-maturus]
    setup-elders]
    [repeat 2 [setup-older-children]
    repeat 2 [setup-juvenes-or-maturus]
    repeat 2 [setup-elders] ]
end

to setup-family-9
table:put family "female-adultus" 1
    table:put f-family-clock 1 one-of (range 25 39)
table:put family "male-adultus" 1
    table:put m-family-clock 1 one-of (range 25 39)
ifelse reduce + table:values f-family-clock + reduce + table:values m-family-clock / 2 <= 30
    [repeat 3 [setup-children]
    setup-older-children
    repeat 2 [setup-juvenes-or-maturus]
    repeat 2 [setup-elders]]

```

```

[repeat 2 [setup-older-children]
  repeat 3 [setup-juvenes-or-maturus]
  repeat 2 [setup-elders] ]
end

to setup-children
  let child-age one-of (range 0 11)
  let child-sex one-of ["female" "male"]
  ifelse child-age >= 6
    [table:put family word child-sex "-infans-b" table:get family word child-sex "-infans-b" + 1]
    [table:put family word child-sex "-infans-a" table:get family word child-sex "-infans-a" + 1]
  ifelse child-sex = "female"
    [table:put f-family-clock (max table:keys f-family-clock + 1) child-age]
    [table:put m-family-clock (max table:keys m-family-clock + 1) child-age]
  end
end

to setup-older-children
  let big-child-age one-of (range 6 19)
  let big-child-sex one-of ["female" "male"]
  ifelse big-child-age >= 12
    [table:put family word big-child-sex "-juvenes" table:get family word big-child-sex "-juvenes" + 1]
    [table:put family word big-child-sex "-infans-b" table:get family word big-child-sex "-infans-b" + 1]
  ifelse big-child-sex = "female"
    [table:put f-family-clock (max table:keys f-family-clock + 1) big-child-age]
    [table:put m-family-clock (max table:keys m-family-clock + 1) big-child-age]
  end
end

to setup-juvenes-or-maturus
  let other-identity one-of ["juvenes" "maturus"]
  let other-sex one-of ["female" "male"]

```

```

ifelse other-identity = "juvenes"

[let other-age-j one-of (range 12 19)

  table:put family word other-sex "-juvenes" table:get family word other-sex "-juvenes" + 1

  ifelse other-sex = "female"

[table:put f-family-clock (max table:keys f-family-clock + 1) other-age-j]
[table:put m-family-clock (max table:keys m-family-clock + 1) other-age-j] ]

[let other-age-m one-of (range 40 59)

  table:put family word other-sex "-maturus" table:get family word other-sex "-maturus" + 1

  ifelse other-sex = "female"

[table:put f-family-clock (max table:keys f-family-clock + 1) other-age-m]
[table:put m-family-clock (max table:keys m-family-clock + 1) other-age-m] ]

end

to setup-elders

let elder-age one-of (range 40 79)

let elder-sex one-of ["female" "male"]

ifelse elder-age >= 60

[table:put family word elder-sex "-seniles" table:get family word elder-sex "-seniles" + 1

  ifelse elder-sex = "female"

[table:put f-family-clock (max table:keys f-family-clock + 1) elder-age]
[table:put m-family-clock (max table:keys m-family-clock + 1) elder-age] ]

[table:put family word elder-sex "-maturus" table:get family word elder-sex "-maturus" + 1

  ifelse elder-sex = "female"

[table:put f-family-clock (max table:keys f-family-clock + 1) elder-age]
[table:put m-family-clock (max table:keys m-family-clock + 1) elder-age] ]

end

to set-spring-season

set season "spring"

```

set R0 14.2

ask min-one-of patches [MeanT] [

set MeanT MeanSPRING + precision (one-of [(1) (-1)] * random-float temperatures-oscillation-range) 1

ask other patches [

set MeanT [MeanT] of myself + MeanSPRING-increase]

]

ask one-of patches with-min [MaxSP] [

set MaxT MaxSP + precision (one-of [(1) (-1)] * random-float temperatures-oscillation-range) 1

ask other patches [

set MaxT [MaxT] of myself + MaxSP-increase]

ask one-of patches with-min [MinSP] [

set MinT MinSP + precision (one-of [(1) (-1)] * random-float temperatures-oscillation-range) 1

ask other patches [

set MinT [MinT] of myself + MinSP-increase]

ask min-one-of patches [precipitations][

set precipitations random-normal SPRING-precipitations ((SPRING-precipitations * 0.98) / 3)

ask other patches [set precipitations [precipitations] of myself + SPRING-precipitations-increase]

]

end

to set-summer-season

set season "summer"

set R0 14.9

```

ask min-one-of patches [MeanT] [
  set MeanT MeanSUMMER + precision (one-of [(1) (-1)] * random-float temperatures-oscillation-range) 1
  ask other patches [
    set MeanT [MeanT] of myself + MeanSUMMER-increase
  ]
]

ask one-of patches with-min [MaxSU] [
  set MaxT MaxSU + precision (one-of [(1) (-1)] * random-float temperatures-oscillation-range) 1
  ask other patches [
    set MaxT [MaxT] of myself + MaxSU-increase ]
]

ask one-of patches with-min [MinSU] [
  set MinT MinSU + precision (one-of [(1) (-1)] * random-float temperatures-oscillation-range) 1
  ask other patches [
    set MinT [MinT] of myself + MinSU-increase ]
]

ask min-one-of patches [precipitations][
  set precipitations random-normal SUMMER-precipitations ((SUMMER-precipitations * 0.98) / 3)
  ask other patches [set precipitations [precipitations] of myself + SUMMER-precipitations-increase]
]

end

to set-autumn-season

  set season "autumn"
  set R0 7.3
  ask min-one-of patches [MeanT] [

```



```

    set MeanT MeanAUTUMN + precision (one-of [(1) (-1)] * random-float temperatures-oscillation-
range) 1

    ask other patches [

        set MeanT [MeanT] of myself + MeanAUTUMN-increase]

    ]

    ask one-of patches with-min [MaxA] [

        set MaxT MaxA + precision (one-of [(1) (-1)] * random-float temperatures-oscillation-range) 1

        ask other patches [

            set MaxT [MaxT] of myself + MaxA-increase] ]

    ask one-of patches with-min [MinA] [

        set MinT MinA + precision (one-of [(1) (-1)] * random-float temperatures-oscillation-range) 1

        ask other patches [

            set MinT [MinT] of myself + MinA-increase] ]

    ask min-one-of patches [precipitations][

        set precipitations random-normal AUTUMN-precipitations ((AUTUMN-precipitations * 0.98) / 3)

        ask other patches [set precipitations [precipitations] of myself + AUTUMN-precipitations-increase]

    ]

end

to set-winter-season

    set season "winter"

    set R0 6.5

    ask min-one-of patches [MeanT] [

        set MeanT MeanWINTER + precision (one-of [(1) (-1)] * random-float temperatures-oscillation-
range) 1

        ask other patches [

            set MeanT [MeanT] of myself + MeanWINTER-increase]

    ]

```

]

ask one-of patches with-min [MaxW] [

set MaxT MaxW + precision (one-of [(1) (-1)] * random-float temperatures-oscillation-range) 1

ask other patches [

set MaxT [MaxT] of myself + MaxW-increase]]

ask one-of patches with-min [MinW] [

set MinT MinW + precision (one-of [(1) (-1)] * random-float temperatures-oscillation-range) 1

ask other patches [

set MinT [MinT] of myself + MinW-increase]]

ask min-one-of patches [precipitations][

set precipitations random-normal WINTER-precipitations ((WINTER-precipitations * 0.98) / 3)

ask other patches [set precipitations [precipitations] of myself + WINTER-precipitations-increase]

]

end

to update-river

let my-radius distance max-one-of patches with [my-site = myself] [distance myself]

ask patches in-radius my-radius with [identity = "river"] [set my-site myself]

set river patches with [my-site = myself] with [identity = "river"]

end

to update-site-patches

ask sites [

update-my-patches

]

end

to update-weights

```

ask connective-links with [[water?] of end1 and [water?] of end2] [
    set weight 1.42]
ask connective-links with [[not water?] of end1 and [water?] of end2] [
    set weight 4.35]
ask connective-links with [[water?] of end1 and [not water?] of end2] [
    set weight 4.35]
ask connective-links with [[not water?] of end1 and [not water?] of end2] with [[not mud?] of end1]
with [[not mud?] of end2]
with [[not forest?] of end1 and [not forest?] of end2][
    set weight 5.1]
ask connective-links with [[mud?] of end1 and [mud?] of end2] [
    set weight 6.89]
ask connective-links with [[not mud?] of end1 and [mud?] of end2] [
    set weight 6] ; media
ask connective-links with [[forest?] of end1 and [forest?] of end2] [
    set weight 5.8]
ask connective-links with [[not forest?] of end1 and [forest?] of end2] [
    set weight 5.4]
ask connective-links with [[forest?] of end1 and [not forest?] of end2] [
    set weight 5.4]

ask connective-links with [[not water?] of end1 or [not water?] of end2] [
    set weight weight * slope-coefficient]
end
to update-crops-and-pastures

ifelse last-year-production = [] or last-year-production = 0

```

```

[set last-mean-production mean table:values crop-productions_kg/ha * crop-energy
set last-year-production []]

[set last-mean-production mean last-year-production

  if last-mean-production = 0 [set last-mean-production mean table:values crop-productions_kg/ha *
crop-energy]

  set last-year-production []]

set need-of-crops round ((population * (1750 * 365)) / last-mean-production)
let extra-need-of-crops ((table:get loss "food") / last-mean-production)

if [favourite] of metal-source = self [
  set need-of-crops need-of-crops * 1.1]

let need-of-pastures population * pastures-per-population

ask crops [become-grass]
ask pastures [become-grass]
update-my-patches

ifelse count grass >= need-of-pastures + need-of-crops + extra-need-of-crops
[ask min-n-of need-of-pastures grass [charge] [become-pastures]]
[ifelse count grass >= need-of-pastures + need-of-crops
[ask min-n-of need-of-pastures grass [charge] [become-pastures]]
[ask min-n-of (count grass - (need-of-crops * 0.9)) grass [charge] [become-pastures]]
]

update-my-patches

ifelse count grass >= need-of-crops

```

```
[ask max-n-of need-of-crops my-patches with [identity = "grass"] [charge / distance myself]
[become-crops]]
```

```
[ask grass [become-crops]]
```

```
update-my-patches
```

```
end
```

```
to update-forest
```

```
set need-of-forest population
```

```
if count forest < need-of-forest
```

```
[set my-farthest-patch max-one-of my-patches with [my-site = myself] [distance myself]
```

```
let possible-extra-forest patches in-radius (distance my-farthest-patch) with [my-site = 0] with
[identity = "forest"]
```

```
if any? possible-extra-forest [ifelse need-of-forest < count possible-extra-forest
```

```
[ask n-of (need-of-forest - count forest) possible-extra-forest [set my-site myself]]
```

```
[ask possible-extra-forest [set my-site myself]] ]
```

```
update-my-patches ]
```

```
end
```

```
to choose-microtherm-crop-type
```

```
set crop-suitability table:make
```

```
table:put crop-suitability table:get soil-moistures word "barley" estimated-soil-moisture / abs
table:get optimum-T word season "barley" - MeanT "barley"
```

```
table:put crop-suitability table:get soil-moistures word "emmer/spelt" estimated-soil-moisture / abs
table:get optimum-T word season "emmer/spelt" - MeanT "emmer/spelt"
```

```
table:put crop-suitability table:get soil-moistures word "wheat" estimated-soil-moisture / abs
table:get optimum-T word season "wheat" - MeanT "wheat"
```

```
set crop-type table:get crop-suitability max table:keys crop-suitability
```

```
set crop-suitability 0
```

```

end

to choose-macrotherm-crop-type

ifelse season = "spring"

[
  set crop-suitability table:make

  table:put crop-suitability table:get soil-moistures word "oat" estimated-soil-moisture / abs table:get
  optimum-T word season "oat" - MeanT "oat"

  table:put crop-suitability table:get soil-moistures word "millet" estimated-soil-moisture / abs
  table:get optimum-T word season "millet" - MeanT "millet"

  set crop-type table:get crop-suitability max table:keys crop-suitability

  set crop-suitability 0
]

[set crop-type "millet"]
end

to update-mudness

ask nodes [
  if mud? and [soil-moisture] of patch-here < 5 [
    set mud? false]
  if not mud? and [soil-moisture] of patch-here >= 5 [
    set mud? true]
]

end

to harvest

let st-dev-prod table:get crop-productions_kg/ha crop-type / 3
let max-prod st-dev-prod * round (mean productivity)
let min-prod st-dev-prod * round (mean productivity - 1)

```

```

set production one-of (range min-prod max-prod) * crop-energy
ask my-site [set last-year-production lput production last-year-production]

set crop-type 0
set productivity []

end

to update-my-patches

  set my-patches patches with [my-site = myself]

  set site-area my-patches with [identity = "settlement"]
  set crops my-patches with [identity = "crops"]
  set pastures my-patches with [identity = "pastures"]
  set forest my-patches with [identity = "forest"]
  set grass my-patches with [identity = "grass"]
  update-river

end

to update-fertility-and-charge

  if any? patches with [soil-fertility < max-soil-fertility] with [identity != "crops"] [
    ask patches with [soil-fertility < max-soil-fertility] with [identity != "crops"] [set soil-fertility soil-
    fertility + 0.25]]
  ask patches with [identity = "crops"] [ifelse charge > 0
    [set soil-fertility soil-fertility - 0.25]
    [set soil-fertility soil-fertility - 0.5] ]

  if any? patches with [soil-fertility <= 0] [
    ask patches with [soil-fertility <= 0] [
      set soil-fertility 0
    ]
  ]

```

```
set charge soil-fertility] ]
```

```
if any? patches with [charge < 3] with [identity != "crops"][  
  ask patches with [charge < 3] with [identity != "crops"][  
    set charge charge + 0.25]]  
if any? patches with [identity = "crops"] with [crop-type != 0] [  
  ask patches with [identity = "crops"] with [crop-type != 0] [  
    set charge charge - 0.25]]  
end
```

To update-food-offer-and-demand

Ask sites [

```
ifelse season = "summer"  
  [set seasonal-reserve table:get reserve "food" / 4] ; AMPBV 18  
[ifelse season = "spring"  
  [set seasonal-reserve table:get reserve "food"]  
  [ifelse season = "winter"  
    [set seasonal-reserve table:get reserve "food" / 2]  
    [set seasonal-reserve table:get reserve "food" / 3]]]
```

```
let food-surplus seasonal-reserve - (population * 1750 * 90)
```

```
table:put old-reserve "food" table:get reserve "food"
```

```
ifelse food-surplus >= 0  
[table:put availability "food" food-surplus]  
[table:put necessity "food" abs food-surplus]
```


]

if count sites with [table:get availability "food" > 0] >= 2

[let food-availability-stdev standard-deviation [table:get availability "food"] of sites with [table:get availability "food" > 0]

ask sites [

ifelse food-availability-stdev > 0

[table:put offer "food" round (table:get availability "food" / food-availability-stdev)]

[table:put offer "food" 1]

]]

if count sites with [table:get necessity "food" > 0] >= 2

[let food-necessity-stdev standard-deviation [table:get necessity "food"] of sites with [table:get necessity "food" > 0]

ask sites [

ifelse food-necessity-stdev > 0

[table:put demand "food" round (table:get necessity "food" / food-necessity-stdev)]

[table:put demand "food" 1]

]]

end

to update-workers-offer-and-demand

ask sites [table:put old-reserve "workers" table:get reserve "workers"]

if count sites with [table:get availability "workers" > 0] >= 2

[let workers-availability-stdev standard-deviation [table:get availability "workers"] of sites with [table:get availability "workers" > 0]

ask sites [

ifelse workers-availability-stdev > 0

[table:put offer "workers" round (table:get availability "workers" / workers-availability-stdev)]

```

[table:put offer "workers" 1]

]]

if count sites with [table:get necessity "workers" > 0] >= 2

  [let workers-necessity-stdev standard-deviation [table:get necessity "workers"] of sites with
[table:get necessity "workers" > 0]

  ask sites [

    ifelse workers-necessity-stdev > 0

      [table:put demand "workers" round (table:get necessity "workers" / workers-necessity-stdev)]

      [table:put demand "workers" 1]

  ]]

end

to update-metal-offer-and-demand

ask sites [

  set m-import-potential 1 / [nw:weighted-distance-to [b-node] of metal-source "weight"] of my-
node

  let potential-importers sites with [my-metal-distance > distance myself] with [my-metal-distance >
[my-metal-distance] of myself]

  let import-links my-in-relational-links with [end1 = one-of potential-importers]

  set m-export-potential sum [reputation] of link-set import-links ]

  let max-import-potential max [m-import-potential] of sites + 1

  let max-import-power max [table:get offer "food" + table:get offer "workers"] of sites + 1

  let max-population max [population] of sites

  let max-export-potential max [m-export-potential] of sites + 1

ask sites [

```

```

let m-imp-potential m-import-potential * 100 / max-import-potential ;
let m-imp-power (table:get offer "food" + table:get offer "workers") * 100 / max-import-power
let m-exp-potential m-export-potential * 100 / max-export-potential
let local-metal-demand population * 100 / max-population
table:put reserve "metal" m-imp-potential * m-imp-power
table:put old-reserve "metal" table:get reserve "metal"
table:put availability "metal" (m-imp-potential * m-imp-power) - local-metal-demand
if table:get availability "metal" <= 0 [table:put availability "metal" 0]
table:put necessity "metal" m-exp-potential + local-metal-demand
]

let metal-availability-stdev standard-deviation [table:get availability "metal"] of sites
let metal-necessity-stdev standard-deviation [table:get necessity "metal"] of sites

ask sites [
  table:put offer "metal" round (table:get availability "metal" / (metal-availability-stdev + 1))
  table:put demand "metal" round (table:get necessity "metal" / (metal-necessity-stdev + 1))
  if table:get demand "metal" = 0 [table:put demand "metal" 1]
]

end

to update-reputation

  ifelse table:get old-reserve priority-1 < table:get reserve priority-1
  [table:put gain priority-1 table:get necessity priority-1 / (table:get reserve priority-1 - table:get old-
reserve priority-1)
  table:put loss priority-1 0]
  [table:put gain priority-1 0
  ifelse table:get old-reserve priority-1 > table:get reserve priority-1
  [table:put loss priority-1 table:get availability priority-1 / (table:get old-reserve priority-1 -
table:get reserve priority-1)]

```

[table:put loss priority-1 0]]

ifelse table:get old-reserve priority-2 < table:get reserve priority-2

[table:put gain priority-2 table:get necessity priority-2 / (table:get reserve priority-2 - table:get old-reserve priority-2)

table:put loss priority-2 0]

[table:put gain priority-2 0

ifelse table:get old-reserve priority-2 > table:get reserve priority-2

[table:put loss priority-2 table:get availability priority-2 / (table:get old-reserve priority-2 - table:get reserve priority-2)]

[table:put loss priority-2 0]]

ifelse table:get old-reserve priority-3 < table:get reserve priority-3

[table:put gain priority-3 table:get necessity priority-3 / (table:get reserve priority-3 - table:get old-reserve priority-3)

table:put loss priority-3 0]

[table:put gain priority-3 0

ifelse table:get old-reserve priority-3 > table:get reserve priority-3

[table:put loss priority-3 table:get availability priority-3 / (table:get old-reserve priority-3 - table:get reserve priority-3)]

[table:put loss priority-3 0]]

ifelse table:get gain priority-1 > 0

[ifelse table:get gain priority-2 = 0

[set exchange-balance table:get gain priority-1 - (table:get loss priority-2 + table:get loss priority-3)]

[set exchange-balance (table:get gain priority-1 + table:get loss priority-2) - table:get loss priority-3]]

[set exchange-balance table:get gain priority-2 - (table:get loss priority-1 + table:get loss priority-3)]

ask in-relational-link-from partner [set reputation lput [exchange-balance] of end2 but-last reputation]

set exchange-balance 0

end

to exchange-1

ifelse [table:get availability [priority-1] of myself] of partner < table:get necessity priority-1

[table:put reserve priority-1 table:get reserve priority-1 + [table:get availability [priority-1] of myself] of partner

ask partner [table:put reserve [priority-1] of myself table:get reserve [priority-1] of myself - [table:get availability [priority-1] of myself] of partner]

let counterpart (table:get availability [priority-1] of partner + [table:get availability priority-1] of partner) * [table:get availability [priority-1] of myself] of partner /

(table:get availability priority-1 + [table:get availability [priority-1] of myself] of partner)

let adjusted-counterpart counterpart * (table:get adjustment [priority-1] of partner / table:get adjustment priority-1)

table:put availability [priority-1] of partner table:get availability [priority-1] of partner - adjusted-counterpart

ask partner [table:put reserve priority-1 table:get reserve priority-1 + adjusted-counterpart

table:put necessity priority-1 table:get necessity priority-1 - adjusted-counterpart]

table:put necessity priority-1 table:get necessity priority-1 - [table:get availability [priority-1] of myself] of partner ; aggiorno alla fine necessity e availability, altrimenti mi sballo il conto prima

ask partner [table:put availability [priority-1] of myself 0]]

[table:put reserve priority-1 table:get reserve priority-1 + table:get necessity priority-1

ask partner [table:put reserve [priority-1] of myself table:get reserve [priority-1] of myself - [table:get necessity priority-1] of myself]

let counterpart-b (table:get availability [priority-1] of partner + [table:get availability priority-1] of partner) * table:get necessity priority-1 /

(table:get availability priority-1 + [table:get availability [priority-1] of myself] of partner)

```

    let adjusted-counterpart-b counterpart-b * (table:get adjustment [priority-1] of partner /
table:get adjustment priority-1)

    table:put availability [priority-1] of partner table:get availability [priority-1] of partner - adjusted-
counterpart-b

    ask partner [table:put reserve priority-1 table:get reserve priority-1 + adjusted-counterpart-b

        table:put necessity priority-1 table:get necessity priority-1 - adjusted-counterpart-b]

    table:put necessity priority-1 0

    ask partner [table:put availability [priority-1] of myself table:get availability [priority-1] of myself -
[table:get necessity priority-1] of myself ]

end

to exchange-2

    ifelse [table:get availability [priority-2] of myself] of partner < table:get necessity priority-2

        [table:put reserve priority-2 table:get reserve priority-2 + [table:get availability [priority-2] of
myself] of partner

            ask partner [table:put reserve [priority-2] of myself table:get reserve [priority-2] of myself -
[table:get availability [priority-2] of myself] of partner]

            let counterpart (table:get availability [priority-2] of partner + [table:get availability priority-2] of
partner) * [table:get availability [priority-2] of myself] of partner /

                (table:get availability priority-2 + [table:get availability [priority-2] of myself] of partner)

            let adjusted-counterpart counterpart * (table:get adjustment [priority-2] of partner / table:get
adjustment priority-2)

            table:put availability [priority-2] of partner table:get availability [priority-2] of partner - adjusted-
counterpart

            ask partner [table:put reserve priority-2 table:get reserve priority-2 + adjusted-counterpart

                table:put necessity priority-2 table:get necessity priority-2 - adjusted-counterpart]

            table:put necessity priority-2 table:get necessity priority-2 - [table:get availability [priority-2] of
myself] of partner ; aggiorno alla fine necessity e availability, altrimenti mi sballo il conto prima

            ask partner [table:put availability [priority-2] of myself 0] ]

        [table:put reserve priority-2 table:get reserve priority-2 + table:get necessity priority-2

```

ask partner [table:put reserve [priority-2] of myself table:get reserve [priority-2] of myself -
[table:get necessity priority-2] of myself]

let counterpart-b (table:get availability [priority-2] of partner + [table:get availability priority-2] of
partner) * table:get necessity priority-2 /

(table:get availability priority-2 + [table:get availability [priority-2] of myself] of partner)

let adjusted-counterpart-b counterpart-b * (table:get adjustment [priority-2] of partner /
table:get adjustment priority-2)

table:put availability [priority-2] of partner table:get availability [priority-2] of partner - adjusted-
counterpart-b

ask partner [table:put reserve priority-2 table:get reserve priority-2 + adjusted-counterpart-b

table:put necessity priority-2 table:get necessity priority-2 - adjusted-counterpart-b]

table:put necessity priority-2 0

ask partner [table:put availability [priority-2] of myself table:get availability [priority-2] of myself -
[table:get necessity priority-2] of myself]

end

to exchange-3

ifelse [table:get availability [priority-3] of myself] of partner < table:get necessity priority-3

[table:put reserve priority-3 table:get reserve priority-3 + [table:get availability [priority-3] of
myself] of partner

ask partner [table:put reserve [priority-3] of myself table:get reserve [priority-3] of myself -
[table:get availability [priority-3] of myself] of partner]

let counterpart (table:get availability [priority-3] of partner + [table:get availability priority-3] of
partner) * [table:get availability [priority-3] of myself] of partner /

(table:get availability priority-3 + [table:get availability [priority-3] of myself] of partner)

let adjusted-counterpart counterpart * (table:get adjustment [priority-3] of partner / table:get
adjustment priority-3)

table:put availability [priority-3] of partner table:get availability [priority-3] of partner - adjusted-
counterpart

ask partner [table:put reserve priority-3 table:get reserve priority-3 + adjusted-counterpart

table:put necessity priority-3 table:get necessity priority-3 - adjusted-counterpart]

table:put necessity priority-3 table:get necessity priority-3 - [table:get availability [priority-3] of myself] of partner ; aggiorno alla fine necessity e availability, altrimenti mi sballo il conto prima

ask partner [table:put availability [priority-3] of myself 0]

[table:put reserve priority-3 table:get reserve priority-3 + table:get necessity priority-3

ask partner [table:put reserve [priority-3] of myself table:get reserve [priority-3] of myself - [table:get necessity priority-3] of myself]

let counterpart-b (table:get availability [priority-3] of partner + [table:get availability priority-3] of partner) * table:get necessity priority-3 /

(table:get availability priority-3 + [table:get availability [priority-3] of myself] of partner)

let adjusted-counterpart-b counterpart-b * (table:get adjustment [priority-3] of partner / table:get adjustment priority-3)

table:put availability [priority-3] of partner table:get availability [priority-3] of partner - adjusted-counterpart-b

ask partner [table:put reserve priority-3 table:get reserve priority-3 + adjusted-counterpart-b

table:put necessity priority-3 table:get necessity priority-3 - adjusted-counterpart-b]

table:put necessity priority-3 0

ask partner [table:put availability [priority-3] of myself table:get availability [priority-3] of myself - [table:get necessity priority-3] of myself]

end

to exchange-2-1

ifelse [table:get availability [priority-1] of myself] of partner < table:get necessity priority-1

[table:put reserve priority-1 table:get reserve priority-1 + [table:get availability [priority-1] of myself] of partner

ask partner [table:put reserve [priority-1] of myself table:get reserve [priority-1] of myself - table:get availability [priority-1] of myself]

let counterpart-e (table:get availability [priority-2] of partner + [table:get availability priority-2] of partner) * [table:get availability [priority-1] of myself] of partner /

(table:get availability priority-1 + [table:get availability [priority-1] of myself] of partner)

let adjusted-counterpart-e counterpart-e * (table:get adjustment [priority-2] of partner /
table:get adjustment priority-1)

table:put availability [priority-2] of partner table:get availability [priority-2] of partner - adjusted-
counterpart-e

ask partner [table:put reserve priority-2 table:get reserve priority-2 + adjusted-counterpart-e

table:put availability priority-2 table:get availability priority-2 - adjusted-counterpart-e

table:put necessity priority-2 table:get necessity priority-2 - adjusted-counterpart-e]

table:put necessity priority-1 table:get necessity priority-1 - [table:get availability [priority-1] of
myself] of partner

ask partner [table:put availability [priority-1] of myself 0]

]

[table:put reserve priority-1 table:get reserve priority-1 + table:get necessity priority-1

ask partner [table:put reserve [priority-1] of myself table:get reserve [priority-1] of myself -
[table:get necessity priority-1] of myself]

let counterpart-f (table:get availability [priority-2] of partner + [table:get availability priority-2] of
partner) * [table:get availability [priority-1] of myself] of partner /

(table:get availability priority-1 + [table:get availability [priority-1] of myself] of partner)

let adjusted-counterpart-f counterpart-f * (table:get adjustment [priority-2] of partner / table:get
adjustment [priority-1] of self) ; AMPBV 21

table:put availability [priority-2] of partner table:get availability [priority-2] of partner - adjusted-
counterpart-f

ask partner [table:put reserve priority-2 table:get reserve priority-2 + adjusted-counterpart-f

table:put necessity priority-2 table:get necessity priority-2 - adjusted-counterpart-f]

table:put necessity priority-1 0

ask partner [table:put availability [priority-1] of myself table:get availability [priority-1] of myself -
[table:get necessity priority-1] of myself]

]

end

to exchange-3-1

ifelse [table:get availability [priority-1] of myself] of partner < table:get necessity priority-1

[table:put reserve priority-1 table:get reserve priority-1 + [table:get availability [priority-1] of myself] of partner

ask partner [table:put reserve [priority-1] of myself table:get reserve [priority-1] of myself - table:get availability [priority-1] of myself]

let counterpart (table:get availability [priority-3] of partner + [table:get availability priority-3] of partner) * [table:get availability [priority-1] of myself] of partner /

(table:get availability priority-1 + [table:get availability [priority-1] of myself] of partner)

let adjusted-counterpart counterpart * (table:get adjustment [priority-3] of partner / table:get adjustment priority-1)

table:put availability [priority-3] of partner table:get availability [priority-3] of partner - adjusted-counterpart

ask partner [table:put reserve priority-3 table:get reserve priority-3 + adjusted-counterpart

table:put availability priority-3 table:get availability priority-3 - adjusted-counterpart

table:put necessity priority-3 table:get necessity priority-3 - adjusted-counterpart]

table:put necessity priority-1 table:get necessity priority-1 - [table:get availability [priority-1] of myself] of partner

ask partner [table:put availability [priority-1] of myself 0]

]

[table:put reserve priority-1 table:get reserve priority-1 + table:get necessity priority-1

ask partner [table:put reserve [priority-1] of myself table:get reserve [priority-1] of myself - [table:get necessity priority-1] of myself]

let counterpart table:get availability [priority-3] of partner + [table:get availability priority-3] of partner * [table:get availability [priority-1] of myself] of partner /

(table:get availability priority-1 + [table:get availability [priority-1] of myself] of partner)

let adjusted-counterpart counterpart * (table:get adjustment [priority-3] of partner / table:get adjustment priority-1) ; AMPBV 21

table:put availability [priority-3] of partner table:get availability [priority-3] of partner - adjusted-counterpart

ask partner [table:put reserve priority-3 table:get reserve priority-3 + adjusted-counterpart

table:put necessity priority-3 table:get necessity priority-3 - adjusted-counterpart]

table:put necessity priority-1 0

ask partner [table:put availability [priority-1] of myself table:get availability [priority-1] of myself - [table:get necessity priority-1] of myself]

```

    ]
end
to exchange-3-2

    ifelse [table:get availability [priority-2] of myself] of partner < table:get necessity priority-2

        [table:put reserve priority-2 table:get reserve priority-2 + [table:get availability [priority-2] of
        myself] of partner

        ask partner [table:put reserve [priority-2] of myself table:get reserve [priority-2] of myself -
        table:get availability [priority-2] of myself]

        let counterpart (table:get availability [priority-3] of partner + [table:get availability priority-3] of
        partner) * [table:get availability [priority-2] of myself] of partner /

        (table:get availability priority-2 + [table:get availability [priority-2] of myself] of partner)

        let adjusted-counterpart counterpart * (table:get adjustment [priority-3] of partner / table:get
        adjustment priority-2)

        table:put availability [priority-3] of partner table:get availability [priority-3] of partner - adjusted-
        counterpart

        ask partner [table:put reserve priority-3 table:get reserve priority-3 + adjusted-counterpart

        table:put availability priority-3 table:get availability priority-3 - adjusted-counterpart

        table:put necessity priority-3 table:get necessity priority-3 - adjusted-counterpart]

        table:put necessity priority-2 table:get necessity priority-2 - [table:get availability [priority-2] of
        myself] of partner

        ask partner [table:put availability [priority-2] of myself 0]

    ]

    [table:put reserve priority-2 table:get reserve priority-2 + table:get necessity priority-2

    ask partner [table:put reserve [priority-2] of myself table:get reserve [priority-2] of myself -
    [table:get necessity priority-2] of myself]

    let counterpart table:get availability [priority-3] of partner + [table:get availability priority-3] of
    partner * [table:get availability [priority-2] of myself] of partner /

    (table:get availability priority-2 + [table:get availability [priority-2] of myself] of partner)

    let adjusted-counterpart counterpart * (table:get adjustment [priority-3] of partner / table:get
    adjustment priority-2)

```

table:put availability [priority-3] of partner table:get availability [priority-3] of partner - adjusted-counterpart

ask partner [table:put reserve priority-3 table:get reserve priority-3 + adjusted-counterpart

table:put necessity priority-3 table:get necessity priority-3 - adjusted-counterpart]

table:put necessity priority-2 0

ask partner [table:put availability [priority-2] of myself table:get availability [priority-2] of myself - [table:get necessity priority-2] of myself]

]

end

to exchange-1-2

ifelse [table:get availability [priority-2] of myself] of partner < table:get necessity priority-2

[table:put reserve priority-2 table:get reserve priority-2 + [table:get availability [priority-2] of myself] of partner

ask partner [table:put reserve [priority-2] of myself table:get reserve [priority-2] of myself - table:get availability [priority-2] of myself]

let counterpart (table:get availability [priority-1] of partner + [table:get availability priority-1] of partner) * [table:get availability [priority-2] of myself] of partner /

(table:get availability priority-2 + [table:get availability [priority-2] of myself] of partner)

let adjusted-counterpart counterpart * (table:get adjustment [priority-1] of partner / table:get adjustment priority-2)

table:put availability [priority-1] of partner table:get availability [priority-1] of partner - adjusted-counterpart

ask partner [table:put reserve priority-1 table:get reserve priority-1 + adjusted-counterpart

table:put availability priority-1 table:get availability priority-1 - adjusted-counterpart

table:put necessity priority-1 table:get necessity priority-1 - adjusted-counterpart]

table:put necessity priority-2 table:get necessity priority-2 - [table:get availability [priority-2] of myself] of partner

ask partner [table:put availability [priority-2] of myself 0]

]

[table:put reserve priority-2 table:get reserve priority-2 + table:get necessity priority-2

ask partner [table:put reserve [priority-2] of myself table:get reserve [priority-2] of myself -
[table:get necessity priority-2] of myself]

let counterpart (table:get availability [priority-1] of partner + [table:get availability priority-1] of
partner) * [table:get availability [priority-2] of myself] of partner /

(table:get availability priority-2 + [table:get availability [priority-2] of myself] of partner)

let adjusted-counterpart counterpart * (table:get adjustment [priority-1] of partner / table:get
adjustment priority-2)

table:put availability [priority-1] of partner table:get availability [priority-1] of partner - adjusted-
counterpart

ask partner [table:put reserve priority-1 table:get reserve priority-1 + adjusted-counterpart

table:put necessity priority-1 table:get necessity priority-1 - adjusted-counterpart]

table:put necessity priority-2 0

ask partner [table:put availability [priority-2] of myself table:get availability [priority-2] of myself -
[table:get necessity priority-2] of myself]

]

end

to exchange-1-3

ifelse [table:get availability [priority-3] of myself] of partner < table:get necessity priority-3

[table:put reserve priority-3 table:get reserve priority-3 + [table:get availability [priority-3] of
myself] of partner

ask partner [table:put reserve [priority-3] of myself table:get reserve [priority-3] of myself -
table:get availability [priority-3] of myself]

let counterpart (table:get availability [priority-1] of partner + [table:get availability priority-1] of
partner) * [table:get availability [priority-3] of myself] of partner /

(table:get availability priority-3 + [table:get availability [priority-3] of myself] of partner)

let adjusted-counterpart counterpart * (table:get adjustment [priority-1] of partner / table:get
adjustment priority-3)

table:put availability [priority-1] of partner table:get availability [priority-1] of partner - adjusted-
counterpart

ask partner [table:put reserve priority-1 table:get reserve priority-1 + adjusted-counterpart

table:put availability priority-1 table:get availability priority-1 - adjusted-counterpart

```

    table:put necessity priority-1 table:get necessity priority-1 - adjusted-counterpart]

    table:put necessity priority-3 table:get necessity priority-3 - [table:get availability [priority-3] of
myself] of partner

    ask partner [table:put availability [priority-3] of myself 0]

]

[table:put reserve priority-3 table:get reserve priority-3 + table:get necessity priority-3

    ask partner [table:put reserve [priority-3] of myself table:get reserve [priority-3] of myself -
[table:get necessity priority-3] of myself]

    let counterpart table:get availability [priority-1] of partner + [table:get availability priority-1] of
partner * [table:get availability [priority-3] of myself] of partner /

    (table:get availability priority-3 + [table:get availability [priority-3] of myself] of partner)

    let adjusted-counterpart counterpart * (table:get adjustment [priority-1] of partner / table:get
adjustment priority-3)

    table:put availability [priority-1] of partner table:get availability [priority-1] of partner - adjusted-
counterpart

    ask partner [table:put reserve priority-1 table:get reserve priority-1 + adjusted-counterpart

        table:put necessity priority-1 table:get necessity priority-1 - adjusted-counterpart]

    table:put necessity priority-3 0

    ask partner [table:put availability [priority-3] of myself table:get availability [priority-3] of myself -
[table:get necessity priority-3] of myself]

]

end

to exchange-2-3

```

```

    ifelse [table:get availability [priority-3] of myself] of partner < table:get necessity priority-3

```

```

    [table:put reserve priority-3 table:get reserve priority-3 + [table:get availability [priority-3] of
myself] of partner

    ask partner [table:put reserve [priority-3] of myself table:get reserve [priority-3] of myself -
table:get availability [priority-3] of myself]

```

let counterpart (table:get availability [priority-2] of partner + [table:get availability priority-2] of partner) * [table:get availability [priority-3] of myself] of partner /

(table:get availability priority-3 + [table:get availability [priority-3] of myself] of partner)

let adjusted-counterpart counterpart * (table:get adjustment [priority-2] of partner / table:get adjustment priority-3)

table:put availability [priority-2] of partner table:get availability [priority-2] of partner - adjusted-counterpart

ask partner [table:put reserve priority-2 table:get reserve priority-2 + adjusted-counterpart

table:put availability priority-2 table:get availability priority-2 - adjusted-counterpart

table:put necessity priority-2 table:get necessity priority-2 - adjusted-counterpart]

table:put necessity priority-3 table:get necessity priority-3 - [table:get availability [priority-3] of myself] of partner

ask partner [table:put availability [priority-3] of myself 0]

]

[table:put reserve priority-3 table:get reserve priority-3 + table:get necessity priority-3

ask partner [table:put reserve [priority-3] of myself table:get reserve [priority-3] of myself - [table:get necessity priority-3] of myself]

let counterpart table:get availability [priority-2] of partner + [table:get availability priority-2] of partner * [table:get availability [priority-3] of myself] of partner /

(table:get availability priority-3 + [table:get availability [priority-3] of myself] of partner)

let adjusted-counterpart counterpart * (table:get adjustment [priority-2] of partner / table:get adjustment priority-3)

table:put availability [priority-2] of partner table:get availability [priority-2] of partner - adjusted-counterpart

ask partner [table:put reserve priority-2 table:get reserve priority-2 + adjusted-counterpart

table:put necessity priority-2 table:get necessity priority-2 - adjusted-counterpart]

table:put necessity priority-3 0

ask partner [table:put availability [priority-3] of myself table:get availability [priority-3] of myself - [table:get necessity priority-3] of myself]

]

end

```

to compute-death-rate
  let previous-population population
  update-local-population
  let season-deaths previous-population - population
  set death-rate season-deaths / previous-population
end

```

To update-infans-a-deceases

```

ask households-here [
  table:put family "female-infans-a" length filter [x -> x < 6] table:values f-family-clock
  table:put family "male-infans-a" length filter [x -> x < 6] table:values m-family-clock ]

let infans-a-households households-here with [(table:get family "female-infans-a" + table:get family
"male-infans-a") > 0]
ask infans-a-households [
  let infans-a-here table:get family "female-infans-a" + table:get family "male-infans-a"
  repeat infans-a-here [
    let infans-a-death-probability (precision ((0.3 / mean-death-age) * (2.71828 ^ (1 - ((3 / mean-
death-age) ^ 0.5)))) 2) * 10
    let infans-a-death-chance random 40000
    if infans-a-death-chance <= infans-a-death-probability [kill-one-infans-a]
  ]
]
end

```

To update-infans-b-deceases

```

ask households-here [
  table:put family "female-infans-b" length filter [x -> x >= 6 and x < 12] table:values f-family-clock
  table:put family "male-infans-b" length filter [x -> x >= 6 and x < 12] table:values m-family-clock ]

```



```
let infans-b-households households-here with [(table:get family "female-infans-b" + table:get family "male-infans-b") > 0]
```

```
ask infans-b-households [
```

```
  let infans-b-here table:get family "female-infans-b" + table:get family "male-infans-b"
```

```
  repeat infans-b-here [
```

```
    let infans-b-death-probability (precision ((0.2 / mean-death-age) * (2.71828 ^ (1 - ((9 / mean-death-age) ^ 0.9)))) 2) * 10
```

```
    let infans-b-weighted-death-probability infans-b-death-probability - (infans-b-death-probability * full-nutrition-benefit)
```

```
    let infans-b-death-chance random 40000
```

```
    if infans-b-death-chance <= infans-b-weighted-death-probability [kill-one-infans-b]
```

```
  ]
```

```
]
```

```
end
```

To update-juvenes-deceases

```
ask households-here [
```

```
  table:put family "female-juvenes" length filter [x -> x >= 12 and x < 20] table:values f-family-clock
```

```
  table:put family "male-juvenes" length filter [x -> x >= 12 and x < 20] table:values m-family-clock ]
```

```
let juvenes-households households-here with [(table:get family "female-juvenes" + table:get family "male-juvenes") > 0]
```

```
ask juvenes-households [
```

```
  let juvenes-here table:get family "female-juvenes" + table:get family "male-juvenes"
```

```
  repeat juvenes-here [
```

```
    let juvenes-death-probability (precision ((0.2 / mean-death-age) * (2.71828 ^ (1 - ((16 / mean-death-age) ^ 0.9)))) 2) * 10
```

```
    let juvenes-weighted-death-probability juvenes-death-probability - (juvenes-death-probability * full-nutrition-benefit)
```

```
    let juvenes-death-chance random 40000
```

```

    if juvenes-death-chance <= juvenes-weighted-death-probability [kill-one-juvenes]
  ]
]
end

```

To update-adultus-deceases

```

ask households-here [
  table:put family "female-adultus" length filter [x -> x >= 20 and x < 40] table:values f-family-clock
  table:put family "male-adultus" length filter [x -> x >= 20 and x < 40] table:values m-family-clock ]

let adultus-households households-here with [(table:get family "female-adultus" + table:get family
"male-adultus") > 0]

ask adultus-households [
  let adultus-here table:get family "female-adultus" + table:get family "male-adultus"

  repeat adultus-here [
    let adultus-death-probability (precision ((1 / mean-death-age) * (2.71828 ^ (1 - ((30 / mean-
death-age) ^ 1)))) 2) * 10

    let adultus-weighted-death-probability adultus-death-probability - (adultus-death-probability *
full-nutrition-benefit)

    let adultus-death-chance random 40000

    if adultus-death-chance <= adultus-weighted-death-probability [kill-one-adultus]
  ]
]
end

```

To update-maturus-deceases

```

ask households-here [
  table:put family "female-maturus" length filter [x -> x >= 40 and x < 60] table:values f-family-clock
  table:put family "male-maturus" length filter [x -> x >= 40 and x < 60] table:values m-family-clock ]

```

```
let matus-households households-here with [(table:get family "female-maturus" + table:get family "male-maturus") > 0]
```

```
ask matus-households [
```

```
  let matus-here table:get family "female-maturus" + table:get family "male-maturus"
```

```
  repeat matus-here [
```

```
    let matus-death-probability (precision ((5 / mean-death-age) * (2.71828 ^ (1 - ((50 / mean-death-age) ^ 5)))) 2) * 20
```

```
    let matus-weighted-death-probability matus-death-probability - (matus-death-probability * full-nutrition-benefit)
```

```
    let matus-death-chance random 40000
```

```
    if matus-death-chance <= matus-weighted-death-probability [kill-one-matus]
```

```
  ]
```

```
]
```

```
end
```

To update-seniles-deceases

```
ask households-here [
```

```
  table:put family "female-seniles" length filter [x -> x >= 60] table:values f-family-clock
```

```
  table:put family "male-seniles" length filter [x -> x >= 60] table:values m-family-clock ]
```

```
let seniles-households households-here with [(table:get family "female-seniles" + table:get family "male-seniles") > 0]
```

```
ask seniles-households [
```

```
  let seniles-here table:get family "female-seniles" + table:get family "male-seniles"
```

```
  repeat seniles-here [
```

```
    let seniles-death-probability (precision ((6 / mean-death-age) * (2.71828 ^ (1 - ((70 / mean-death-age) ^ 6)))) 2) * 50
```

```
    let seniles-weighted-death-probability seniles-death-probability - (seniles-death-probability * full-nutrition-benefit)
```

```
    let seniles-death-chance random 40000
```

```
    if seniles-death-chance <= seniles-weighted-death-probability [kill-one-seniles]
```

```
]
]
end
```

to kill-one-infans-a

```
ifelse length filter [x -> x < 6] table:values m-family-clock = length filter [x -> x < 6] table:values f-family-clock
```

```
[set dead-gender one-of ["male" "female"]]
```

```
[ifelse length filter [x -> x < 6] table:values m-family-clock > length filter [x -> x < 6] table:values f-family-clock
```

```
[set dead-gender "male"]
```

```
[set dead-gender "female"] ]
```

```
ifelse dead-gender = "male"
```

```
[let m-dead-infans-a-age one-of filter [x -> x < 6] table:values m-family-clock
```

```
table:remove m-family-clock item (position m-dead-infans-a-age table:values m-family-clock)
table:keys m-family-clock]
```

```
[let f-dead-infans-a-age one-of filter [x -> x < 6] table:values f-family-clock
```

```
table:remove f-family-clock item (position f-dead-infans-a-age table:values f-family-clock)
table:keys f-family-clock]
```

```
table:put family "male-infans-a" length filter [x -> x < 6] table:values m-family-clock
```

```
table:put family "female-infans-a" length filter [x -> x < 6] table:values f-family-clock
```

end

to kill-one-infans-b

```
ifelse length filter [x -> x >= 6 and x < 12] table:values m-family-clock = length filter [x -> x >= 6 and x < 12] table:values f-family-clock
```

```
[set dead-gender one-of ["male" "female"]]
```

```
[ifelse length filter [x -> x >= 6 and x < 12] table:values m-family-clock > length filter [x -> x >= 6 and x < 12] table:values f-family-clock
```

```
[set dead-gender "male"]
```

```

[set dead-gender "female"] ]

ifelse dead-gender = "male"

[let m-dead-infans-b-age one-of filter [x -> x >= 6 and x < 12] table:values m-family-clock

table:remove m-family-clock item (position m-dead-infans-b-age table:values m-family-clock)
table:keys m-family-clock]

[let f-dead-infans-b-age one-of filter [x -> x >= 6 and x < 12] table:values f-family-clock

table:remove f-family-clock item (position f-dead-infans-b-age table:values f-family-clock)
table:keys f-family-clock]

table:put family "male-infans-b" length filter [x -> x >= 6 and x < 12] table:values m-family-clock
table:put family "female-infans-b" length filter [x -> x >= 6 and x < 12] table:values f-family-clock

end

to kill-one-juvenes

```

```

ifelse length filter [x -> x >= 12 and x < 20 ] table:values m-family-clock = length filter [x -> x >= 12
and x < 20 ] table:values f-family-clock

```

```

[set dead-gender one-of ["male" "female"]]

[ifelse length filter [x -> x >= 12 and x < 20 ] table:values m-family-clock > length filter [x -> x >= 12
and x < 20 ] table:values f-family-clock

[set dead-gender "male"]

[set dead-gender "female"] ]

ifelse dead-gender = "male"

[let m-dead-juvenes-age one-of filter [x -> x >= 12 and x < 20 ] table:values m-family-clock

table:remove m-family-clock item (position m-dead-juvenes-age table:values m-family-clock)
table:keys m-family-clock]

[let f-dead-juvenes-age one-of filter [x -> x >= 12 and x < 20 ] table:values f-family-clock

table:remove f-family-clock item (position f-dead-juvenes-age table:values f-family-clock)
table:keys f-family-clock]

```

```

table:put family "male-juvenes" length filter [x -> x >= 12 and x < 20] table:values m-family-clock

```

```
table:put family "female-juvenes" length filter [x -> x >= 12 and x < 20] table:values f-family-clock
```

```
end
```

```
to kill-one-adultus
```

```
  ifelse length filter [x -> x >= 20 and x < 40] table:values m-family-clock = length filter [x -> x >= 20  
and x < 40] table:values f-family-clock
```

```
    [set dead-gender one-of ["male" "female"]]
```

```
  [ifelse length filter [x -> x >= 20 and x < 40] table:values m-family-clock > length filter [x -> x >= 20  
and x < 40] table:values f-family-clock
```

```
    [set dead-gender "male"]
```

```
    [set dead-gender "female" ]
```

```
  ifelse dead-gender = "male"
```

```
    [let m-dead-adultus-age one-of filter [x -> x >= 20 and x < 40] table:values m-family-clock
```

```
      table:remove m-family-clock item (position m-dead-adultus-age table:values m-family-clock)  
table:keys m-family-clock]
```

```
    [let f-dead-adultus-age one-of filter [x -> x >= 20 and x < 40] table:values f-family-clock
```

```
      table:remove f-family-clock item (position f-dead-adultus-age table:values f-family-clock) table:keys  
f-family-clock]
```

```
table:put family "male-adultus" length filter [x -> x >= 20 and x < 40] table:values m-family-clock
```

```
table:put family "female-adultus" length filter [x -> x >= 20 and x < 40] table:values f-family-clock
```

```
end
```

```
to kill-one-maturus
```

```
  ifelse length filter [x -> x >= 40 and x < 60] table:values m-family-clock = length filter [x -> x >= 40  
and x < 60] table:values f-family-clock
```

```
    [set dead-gender one-of ["male" "female"]]
```

```
  [ifelse length filter [x -> x >= 40 and x < 60] table:values m-family-clock > length filter [x -> x >= 40  
and x < 60] table:values f-family-clock
```

```

[set dead-gender "male"]

[set dead-gender "female" ]

ifelse dead-gender = "male"

[let m-dead-maturus-age one-of filter [x -> x >= 40 and x < 60] table:values m-family-clock

table:remove m-family-clock item (position m-dead-maturus-age table:values m-family-clock)
table:keys m-family-clock]

[let f-dead-maturus-age one-of filter [x -> x >= 40 and x < 60] table:values f-family-clock

table:remove f-family-clock item (position f-dead-maturus-age table:values f-family-clock)
table:keys f-family-clock]


table:put family "male-maturus" length filter [x -> x >= 40 and x < 60] table:values m-family-clock
table:put family "female-maturus" length filter [x -> x >= 40 and x < 60] table:values f-family-clock


end

to kill-one-seniles

ifelse length filter [x -> x >= 60] table:values m-family-clock = length filter [x -> x >= 60] table:values
f-family-clock

[set dead-gender one-of ["male" "female"]]

[ifelse length filter [x -> x >= 60] table:values m-family-clock > length filter [x -> x >= 60] table:values
f-family-clock

[set dead-gender "male"]

[set dead-gender "female" ]

ifelse dead-gender = "male"

[let m-dead-seniles-age one-of filter [x -> x >= 60] table:values m-family-clock

table:remove m-family-clock item (position m-dead-seniles-age table:values m-family-clock)
table:keys m-family-clock]

[let f-dead-seniles-age one-of filter [x -> x >= 60] table:values f-family-clock

table:remove f-family-clock item (position f-dead-seniles-age table:values f-family-clock) table:keys
f-family-clock]

```

```
table:put family "male-seniles" length filter [x -> x >= 60] table:values m-family-clock  
table:put family "female-seniles" length filter [x -> x >= 60] table:values f-family-clock
```

end

to generate-a-child

```
let newborn-gender one-of ["female" "male"]
```

```
table:put family word newborn-gender "-infans-a" table:get family word newborn-gender "-infans-a" + 1
```

```
ifelse newborn-gender = "female"
```

```
[table:put f-family-clock (max table:keys f-family-clock + 1) 0]
```

```
[table:put m-family-clock (max table:keys m-family-clock + 1) 0]
```

end

to migrate

move-to new-home

```
if my-home != nobody and my-home != 0 [ask my-home [update-local-population]]
```

```
set my-home new-home
```

```
set new-home ""
```

```
ask my-home [update-local-population]
```

end

to check-population

```
if tot-female-adultus + tot-male-adultus < 20 [
```

```
ask households-here [set my-home 0 set new-home "?"]
```

```
ask crops [become-grass]
```

```
ask pastures [become-grass]
```

```
ask site-area [become-grass]
```



```
ask my-patches [set my-site 0]
die
]
end

to become-site-area
  set identity "settlement"
  set pcolor red
end

to become-forest
  set identity "forest"
  set pcolor green - 1
end

to become-grass
  set identity "grass"
  set pcolor green
  set crop-type 0 ; AMPBV 22
end

to become-crops
  set identity "crops"
  set pcolor yellow
end

to become-pastures
  set identity "pastures"
  set pcolor green + 1
end
```

Appendice B: Schede sito

N° 2

Località

ASELOGNA

CEREA

VR

Quota s.l.m.

14 m s.l.m.

Coord. WGS_1984_UTM_Zone_32N

X
Y

677202,067

5003828,24

Unità fisiografica

PIANURA

Tessitura suolo (1m)

FRANCO-LIMOSA

Tipologia

INSEDIAMENTO

Estensione nota

NO

Estensione
nel modello

2

CRONOLOGIA

B BM ? BM3 BR BR1 BR2 BF
BF1

N°

3

Località

CANOVA

CASTELNOVO BARIANO

RO

Quota s.l.m.

10 m sl.m.

Coord. WGS_1984_UTM_Zone_32N

X

?

Y

4991902,49

Unità fisiografica

Pianura, morfologia relativamente rialzata

Tessitura suolo (1m)

FRANCO LIMOSA ARGILLOSA

Tipologia

INSEDIAMENTO

Estensione nota

2ha

Estensione
nel modello

2

CRONOLOGIA

BR2

N°

4

Località

CASTEL DI MACCACARI

GAZZO VERONESE

VR

Quota s.l.m.

14 m s.l.m.

Coord. WGS_1984_UTM_Zone_32N

X

668357,244

Y

5001366,25

Unità fisiografica

Pianura, presso un'area
morfologicamente rialzata

Tessitura suolo (1m)

FRANCO SABBIOSA

Tipologia

Insediamiento

Estensione nota

8ha

Estensione
nel modello

8

CRONOLOGIA

BR

N° 5

Località

CASTELLO DEL TARTARO

CEREA

VR

Quota s.l.m.

9,5 m s.l.m.

Coord. WGS_1984_UTM_Zone_32N

X
Y

675239,127

4998294,33

Unità fisiografica

Pianura, presso paleoalveo del Tregnone

Tessitura suolo (1m)

FRANCA

Tipologia

INSEDIAMENTO

Estensione nota

12 ha

Estensione
nel modello

12

CRONOLOGIA

BM3 BR BR1? BR2 XV XIV XIII
XII

N° 6

Località

COP ROMAN

GAZZO VERONESE

VR

Quota s.l.m.

14 m s.l.m.

Coord. WGS_1984_UTM_Zone_32N

X
Y

664807,325

4998039,29

Unità fisiografica

Pianura, presso la confluenza del fiume Tartaro con il Tione, coperto da una coltre di terreno torboso

Tessitura suolo (1m)

FRANCA

Tipologia

INSEDIAMENTO

Estensione nota

NO

Estensione
nel modello

2

CRONOLOGIA

B BM BM2 BM3 BR ? BR2 BR/BF BF
BF3

N° 7

Località

FABBRICA DEI SOCI

VILLABARTOLOMEA

VR

Quota s.l.m.

10 m s.l.m.

Coord. WGS_1984_UTM_Zone_32N

X
Y

?

4995155,36

Unità fisiografica

Pianura, presso il paleoalveo di Frnazine

Tessitura suolo (1m)

FRANCO LIMOSA

Tipologia

INSEDIAMENTO

Estensione nota

6ha

Estensione
nel modello

6

CRONOLOGIA

B BM BM3 BM/BR BR BR2 BR/BF BF
BF/FE

N° 15

Località

FINILONE

GAZZO VERONESE

VR

Quota s.l.m.

16 m s.l.m.

Coord. WGS_1984_UTM_Zone_32N

X
Y

660796,093

4998542,82

Unità fisiografica

Pianura

Tessitura suolo (1m)

FRANCO SABBIOSA

Tipologia

INSEDIAMENTO

Estensione nota

NO

Estensione
nel modello

2

CRONOLOGIA

BR BR1?
BR2

N° 8

Località

FONDO PAVIANI

LEGNAGO

VR

Quota s.l.m.

9 m s.l.m.

Coord. WGS_1984_UTM_Zone_32N

X
Y

680007

4998839

Unità fisiografica

Pianura, paleovalle del fiume
Menago

Tessitura suolo (1m)

FRANCO ARGILLOSA

Tipologia

INSEDIAMENTO

Estensione nota

19 ha

Estensione
nel modello

19

CRONOLOGIA

B BM BM3 BM/BR BR BR1 BR2 BR/BF BF BF1
BF2

N° 9

Località

LOVARA

VILLABARTOLOMEA

VR

Quota s.l.m.

14 m s.l.m.

Coord. WGS_1984_UTM_Zone_32N

X
Y

?

5000590,72

Unità fisiografica

Pianura

Tessitura suolo (1m)

FRANCO SABBIOSA

Tipologia

INSEDIAMENTO

Estensione nota

11 ha

Estensione
nel modello

11

CRONOLOGIA

BR BR1? BR2 BR2/BF1 VIII VII
VI

N° 10

Località

MAZZAGATTA

OSTIGLIA

MN

Quota s.l.m.

11 m s.l.m.

Coord. WGS_1984_UTM_Zone_32N

X
Y

669909,232

4997193,33

Unità fisiografica

Pianura

Tessitura suolo (1m)

FRANCA FINE

Tipologia

INSEDIAMENTO

Estensione nota

NO

Estensione
nel modello

2

CRONOLOGIA

B BM BM3 BR BR1
BR2

N° 11

Località

MERLARA-Ponte delle
Gradenighe

MERLARA

PD

Quota s.l.m.

9 m s.l.m.

Coord. WGS_1984_UTM_Zone_32N

X
Y

692874,403

5002276,26

Unità fisiografica

Pianura

Tessitura suolo (1m)

FRANCO SABBIOSA

Tipologia

INSEDIAMENTO

Estensione nota

NO

Estensione
nel modello

2

CRONOLOGIA

BA? BR BR1? BR2 BR2-BF1 BF1
-2

N° 12

Località

STANGHELETTI

VILLABARTOLOMEA

VR

Quota s.l.m.

10 m s.l.m.

Coord. WGS_1984_UTM_Zone_32N

X
Y

686798,916

4996571,41

Unità fisiografica

Pianura, presso un antico canale endolagunare

Tessitura suolo (1m)

FRANCO LIMOSA

Tipologia

INSEDIAMENTO

Estensione nota

NO

Estensione
nel modello

2

CRONOLOGIA

B BM BM1 BM2 BM3 BR BR2 BF BF1
BF2

N° 13

Località

TOMBOLA

CEREA

VR

Quota s.l.m.

15 m s.l.m.

Coord. WGS_1984_UTM_Zone_32N

X
Y

673822,124

5005504,19

Unità fisiografica

Pianura, su paleoalveo incassato del fiume Adige

Tessitura suolo (1m)

FRANCA

Tipologia

INSEDIAMENTO

Estensione nota

NO

Estensione
nel modello

2

CRONOLOGIA

B BM ? BM3 BR
BR2

N° 14

Località

VENEZIA NUOVA

VILLABARTOLOMEA

VR

Quota s.l.m.

12 m s.l.m.

Coord. WGS_1984_UTM_Zone_32N

X
Y

683387,969

4999242,35

Unità fisiografica

Pianura

Tessitura suolo (1m)

FRANCO LIMOSA

Tipologia

INSEDIAMENTO

Estensione nota

NO

Estensione
nel modello

2

CRONOLOGIA

B BR
BR2