



**Universitat de les
Illes Balears**

Noves tecnologies per a l'estudi dels processos en geomorfologia: Càlcul de l'erosió del sòl amb dades LiDAR

NOM AUTOR: Pere Joan Gelabert Vadillo

DNI AUTOR: 43228133R

NOM TUTOR: Celso García García

Memòria del Treball de Final de Grau

Estudis de Grau de Geografia

Paraules clau: Erosió del sòl, geomorfologia, topografia, teledetecció, SIG, LiDAR.

de la
UNIVERSITAT DE LES ILLES BALEARS

Curs Acadèmic 2014-2015

Cas de no autoritzar l'accés públic al TFG, marqui la següent casella:

Resum

Els models paramètrics, formulats en base a la repetició d'experiments de camp, han estat el mètode més utilitzat per estudiar l'erosió des de la dècada dels anys 1970. Actualment, les noves tecnologies topogràfiques ens ofereixen grans possibilitats en matèria de mostreig, emmagatzematge i tractament de dades, que ha permès augmentar la capacitat de processament, tant pel que fa al volum com a la precisió d'aquestes. Els models digitals que es poden derivar són molt fidels a la realitat. Per aquesta raó es proposa fer servir aquestes tecnologies per estudiar l'erosió dels sòls, com a alternativa als mètodes clàssics. La metodologia emprada, basada en dades LiDAR, s'ha aplicat en dues parcel·les agrícoles a l'illa de Mallorca – a la Vall d'en Marc (Pollença) i a la Vall de Sóller– . Cada píxel dels MDEs generats (amb una resolució de 0,0625 m²) s'ha analitzat com un prisma, en dues dates diferents (2005 i 2014). La diferència d'altura dels prismes entre els dos moments analitzats marca l'evolució diacrònica del volum de sediment emmagatzemat per píxel. La taxa d'erosió obtinguda per a cadascuna de les parcel·les agrícoles – Vall d'en Marc $11,78 \pm 0,11 \text{ T ha}^{-1}\text{any}^{-1}$ i a la vall de Sóller $91,26 \pm 0,37 \text{ T ha}^{-1}\text{any}^{-1}$ – mostra que la metodologia proposada dona uns resultats força diferents als obtinguts amb la RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*), amb més precisió i que permet estimar l'evolució de l'erosió dels vessants sense limitacions d'escala ni de resolució espacial, alhora que facilita l'estudi i monitorització de les parcel·les amb un mètode més senzill, àgil, precís i fiable, que no depèn de paràmetres poc objectius.

Acrònims

ALS – *Aerial Laser Scan*

GPS – *Global Positioning System*

IGN – *Instituto Geográfico Nacional*

LiDAR – *Light Detection and Ranging*

MDE – *Model digital d'elevacions*

MDT – *Model digital del terreny*

ME – *Mapa d'erosió*

ND – *Nivell digital*

NTT – *Noves tecnologies topogràfiques*

PNOA – *Plan Nacional de Ortofotografía Aérea*

RUSLE – *Revised Universal Soil Loss Equation*

SfM – *Structure From Motion*

SIG – *Sistemas d'Informació Geogràfica*

TLS – *Terrestrial Laser Scan*

USLE – *Universal Soil Loss Equation*

Agraïments

En primer lloc desig expressar el meu agraïment al tutor d'aquest Treball de Fi de Grau, Dr. Celso García, per la seva dedicació i suport donat en tot moment.

Al meu amic Alberto, per l'assessorament prestat durant el treball de camp i a l'hora de fer certes interpretacions. També és mereixedora d'un reconeixement la companya Esther Martínez, per ser una guia i ajuda amb la RUSLE.

A l'equip del SSIGT, concretament a Dr. Maurici Ruíz i Carles Homs, per haver posat a disposició tot el material tècnic.

Al propietari de la parcel·la de la Vall d'en Marc, Dr. Josep Cifre, que cedí el terreny i al ser membre del Departament de Biologia de la UIB, s'ha involucrat en el treball (juntament amb el seu company de departament Dr. Joan Rosselló) prestant un GPS; en el moment que el del SSIGT no va funcionar. També rep el mateix reconeixement la propietària de la parcel·la de Sóller, Teresa Morell.

Finalment, fent un agraïment generalitzat a l'etapa del grau, vull expressar gratitud per tot el suport rebut per familiars i amistats; expressament el de la meva mare.

Índex de Continguts

1. INTRODUCCIÓ	1
1.1 OBJECTIUS.....	3
2. ÀREES D'ESTUDI	4
2.1. ÀREA D'ESTUDI I - VALL D'EN MARC	4
2.2. ÀREA D'ESTUDI II - VALL DE SÓLLER.....	6
3. MATERIALS	8
4. METODOLOGIA	9
4.1. CÀLCUL AMB RUSLE	9
4.2. CÀLCUL DE L'EROSIÓ AMB NOVES TECNOLOGIES TOPOGRÀFIQUES.....	11
5. RESULTATS	13
5.1. MODELS DIGITALS D'ELEVACIÓ.....	13
5.2. BALANÇ DE SEDIMENT	14
5.2.1. <i>Balanç de sediment calculat amb la RUSLE</i>	14
5.2.2. <i>Balanç de sediment calculat amb NTT</i>	14
5.3. DISTRIBUCIÓ DE LA SEDIMENTACIÓ.....	16
5.4. EFECTE DEL PENDENT.....	16
6. DISCUSSIÓ	17
6.1. VALORACIÓ DELS MÈTODES UTILITZATS.....	17
6.2. PÈRDUA DE SÒL.....	18
6.3. EFECTE DE LES BARRERES FÍSQUES SOBRE LA CAPACITAT DE RETENCIÓ DE SEDIMENT	19
6.4. ANÀLISI COMPARATIU DE LES DUES ÀREES D'ESTUDI	20
7. CONCLUSIONS	21
BIBLIOGRAFIA	22

Índex de Figures

Figura 1: Rang de densitat de punts que ens oferta cada tecnologia. a) Terrestrial Laser Scan, b) Fotogrametria Digital Automatitzada (SfM), c) Aerial Laser Scan, d) Global Positioning System, e) Processat d'imatges de Satèl·lit. Adaptat de Brasington et al. (2012).	2
Figura 2: Localització de l'àrea d'estudi I. Fonts cartogràfiques: Cartociudad IGN, WMS 1.3.0 Hidrologia IDEIB	4
Figura 3: Correlació de la mitjana de precipitació mensual entre les estacions B-006 i B-760	4
Figura 4: Evolució dels usos del sòl a l'àrea d'estudi I (Vall d'en Marc). Font cartogràfica: WMS Ortofotos IDEIB	5
Figura 5: Localització de l'àrea d'estudi II. Fonts cartogràfiques: Cartociudad IGN, WMS 1.3.0 Hidrologia IDEIB	6
Figura 6: Correlació de la mitjana de precipitació mensual entre les estacions B-061 i B-056	6
Figura 7: Evolució dels usos del sòl a l'àrea d'estudi II (Vall de Sóller). Fonts cartogràfica: WMS Ortofotos IDEIB	7
Figura 8: Model conceptual de la metodologia per calcular l'erosió amb NTT	12
Figura 9: Relació de l'error amb el valor mesurat a) MDE (2005) de l'àrea d'estudi I b) MDE (2014) de l'àrea d'estudi I c) MDE (2005) de l'àrea d'estudi II d) MDE (2014) de l'àrea d'estudi II.....	13
Figura 10: Balanç de sediment a) l'àrea d'estudi I b) l'àrea d'estudi II	14
Figura 11: Mapa del balanç de sediment a) àrea d'estudi I a Vall den Marc b) àrea d'estudi II a la vall de Sóller.....	15
Figura 12: Variació de la làmina de sòl.....	15
Figura 13: a) Mapa de representatiu de la sedimentació generada pels arbres b) Mapa representatiu per la sedimentació generada per la paret	16
Figura 14: Relació entre la taxa d'erosió i el pendent a) àrea I b) àrea II	16

Índex de Taules

Taula 1: Tipologia d'erosió en vessants segons l'agent erosiu. Font: Almorox et al., 2010.....	1
Taula 2: Noves tecnologies topogràfiques o NTT. Elaborat a partir de Chuvieco (2000), Pozo-Ruz (2000), Slob i Hack (2004), Liu (2008) i Rodríguez (2012).	3
Taula 3: Resum estadístic de les precipitacions a l'estació B-670 Pollença durant el període (1969-2005).....	5
Taula 4: Resum estadístic de les precipitacions a l'estació B-061 Sóller durant el període (1969-2009).....	7
Taula 5: Factor de la coberta vegetal (C) (adimensional) Font: Ranzi et al. (2012)	10
Taula 6: Factor de les pràctiques de conservació (P) (adimensional) Font: Pham (2007).....	10
Taula 7: Factor de l'erosionabilitat del sòl (K) ($T MJ^{-1} h^{-1} mm^{-1}$) Font: Vezina et al. (2006).....	11
Taula 8: Resultats de l'error dels MDE utilitzats	13
Taula 9: Taula interpretativa dels valors de pèrdua de sòl. Segons Edeso et al. (1997)	19

1. Introducció

L'erosió en vessants és atribuïda sovint a l'impacte de les gotes de pluja sobre el sòl nu, que produeix la disgregació de les partícules més fines perquè puguin ser transportades pel flux d'aigua, és a dir per l'aigua que no s'ha pogut infiltrar dins el sòl (MOPT, 1992). Però aquest concepte és incomplet, ja que només fa referència a l'erosió hídrica, sense fer esment de l'acció del vent i les activitats antròpiques, que poden ser inclús més destructives (taula 1). Horton (1945) aporta una definició més simple però més exacta: l'erosió és la quantitat de material de la superfície del sòl moguda per unitat de temps i d'àrea. Molts han estat els procediments proposats per estimar les pèrdues de sòl, però la USLE (*Universal Soil Loss Equation*; Wischmeier i Smith, 1978; encara que proposada ja al 1962) i la posterior revisió o RUSLE (Renard et al., 1991) són les que han tingut una major acceptació i difusió arreu del món (González, 1991). Prèviament a la formulació definitiva de la USLE, cal destacar algunes aportacions fonamentals al camp de l'estudi de l'erosió. Zing (1940) va relacionar l'erosió amb el pendent i la longitud. Musgrave (1947) va donar importància al factor climàtic, estudiant la precipitació màxima durant els primers 30 minuts de pluja per a un període de retorn de dos anys. Smith (1958) va introduir la qüestió del grau de protecció del sòl. Tant l'USLE com la RUSLE es fonamenten en una formulació paramètrica, que presenta algunes limitacions (Hudson, 1993): (1) no pot calcular les pèrdues degudes a esdeveniments puntuals extrems, ja que només fa mitjanes a llarg termini; (2) el seu resultat és un valor mitjà per a tota l'àrea, no té en consideració que les pèrdues de sòl als punts situats entre la part alta i la part baixa del vessant poden ser notables, sobretot si el vessant té molta longitud; (3) no pot predir la producció de sediments d'una conca, ja que no inclou relació de dipòsits i lliurament; (4) no té en compte la pèrdua de sòl fora del rang de la seva base de dades (v. g. el factor pendent només s'ha determinat experimentalment fins a valors de 16%), l'extrapolació més enllà d'aquests valors ha de ser comprovada experimentalment; (5) considera els diferents factors de manera separada, com si no fossin interdependents; (6) està poc adaptat a les àrees forestals, i només considera les espècies vegetals pròpies dels EUA; (7) es basa únicament en experiències desenvolupades per la USDA (Departament d'Agricultura dels EUA). Per tot això, es pot considerar un model poc precís, especialment quan l'escala d'estudi és la d'una sola parcel·la agrícola.

Tipus	Sub-tipus	Comportament
Erosió hídrica	Laminar i entre solcs	Impacte de la gota, disgregació i transport per un flux poc profund i homogeni. En absència de flux (v. g. gran infiltració) les partícules afectades per l'esquitx i properes als solcs són les úniques transportades
	Entre solcs	Concentració del flux en corrents capaces d'obrir petits solcs
	Per riells i barrancs	En àrees amb fort pendent, es formen canals amb una ràtio amplitud-profunditat molt escassa (barrancs i xaragalls)
Erosió eòlica		Activa en àrees on es donen una o més d'aquestes premisses: a) vents forts i freqüents; b) superfícies planes exposades; c) sòl sec, disgregat i de textura fina; d) aridesa; e) escassa coberta vegetal
Erosió antròpica		Motivada per la presència i activitats humanes

Taula 1: Tipologia d'erosió en vessants segons l'agent erosiu. Font: Almorox et al., 2010.

Actualment, la revolució tecnològica ha permès augmentar de manera crítica la capacitat de mostreig i càlcul i millorar la precisió de les dades recollides (Tarolli, 2014). A més, aquestes tecnologies s'han anat abaratint amb el temps, tornant-se accessibles per als grups d'investigació. Els camps de la geografia física i la geomorfologia no han quedat enrere en aquest aspecte. L'evolució de les tecnologies d'informació geogràfica ha facilitat l'elaboració de models cada cop més precisos. Un model, en la seva accepció geogràfica, és una representació simplificada de la realitat que mostra alguna/es de les seves propietats. Els models digitals del terreny (MDT) poden representar diferents variables espacials, com ara el grau i la direcció del pendent o la seva concavitat. Els models digitals d'elevació (MDE) representen només l'altura, entesa com la distància vertical entre la cota del punt representat i el nivell de la mar en el punt de referència. La informació necessària per generar un MDE es pot obtenir avui en dia de manera directa (Felicísimo, 1994) a través de: (a) altímetres aerotransportats; (b) tecnologia GPS; i/o (c) estacions topogràfiques amb sortida digital. De manera indirecta es pot obtenir realitzant una restitució fotogramètrica de dades obtingudes per teledetecció (taula 2). La informació, recollida de manera remota en qualsevol dels casos, és plasmada en una malla de punts que incorporen entre els seus atributs les coordenades X, Y i Z que permetran modelitzar el terreny en les tres dimensions de l'espai. L'ús d'aquestes noves tecnologies topogràfiques (NTT) depèn de l'escala d'estudi i de la resolució requerida. En aquest treball, els requeriments són de topografia de detall i, per tant, la resolució dels models utilitzats ha de ser molt elevada. Segons Brasington et al. (2012) el TLS (*Terrestrial Laser Scan*) és la tecnologia que ofereix una major densitat de punts (fins a 1.000 per m²), seguida de la Fotogrametria Digital Automatitzada (SfM), que en funció de la mida del píxel fotogràfic permet generar malles de fins a 100 punts per m². L'ALS (*Aerial Laser Scan*) ofereix una densitat d'1 punt per m², similar a la del GPS. En canvi, les imatges satèl·lit, degut a la distància que separa el visor de la superfície, presenta una resolució molt menor (figura 1). La disponibilitat de dades d'alta resolució amplia els límits de la cartografia de l'erosió i permet millorar el coneixement del seu risc associat, alhora que generar noves metodologies de planificació i gestió del sòl (Tarolli et al., 2015). El seu ús en l'estudi de la geomorfologia de conques i vessants ha patit un progrés constant durant els darrers anys (Brasington et al., 2000, 2012; Brasington i Smart, 2003; Wheaton et al., 2010; Tarolli, 2014; Vericat et al., 2014; Tarolli et al., 2015). Conegudes les limitacions dels models paramètrics i les possibilitats tècniques de les NTT, es planteja la següent hipòtesi: que *les NTT ofereixen uns resultats més precisos que les formulacions paramètriques que fins ara s'han emprat de manera gairebé unànime per estudiar l'erosió en vessants*.

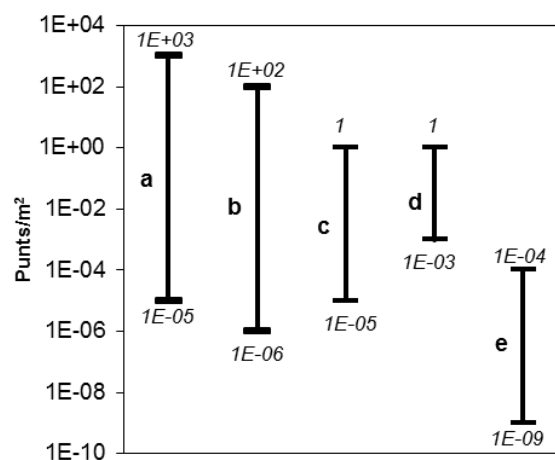


Figura 1: Rang de densitat de punts que ens oferta cada tecnologia. a) *Terrestrial Laser Scan*, b) *Fotogrametria Digital Automatitzada (SfM)*, c) *Aerial Laser Scan*, d) *Global Positioning System*, e) *Processat d'imatges de Satèl·lit*. Adaptat de Brasington et al. (2012).

Tecnologia	Funcionament
Aerial Laser Scan (ALS)	També coneguda com a LiDAR aerotransportat. L'altímetre és transportat per un avió. Les coordenades X i Y de cada punt són obtingudes per GPS i la coordenada Z mitjançant la intensitat amb que són reflectits els polsos de llum que emet el Laser Scan.
Terrestrial Laser Scan (TLS)	Similar a l'ALS, però l'altímetre es manté estàtic a la superfície, suportat per un trípede.
Fotogrametria Digital Automatitzada (SfM)	Tractament d'imatges fotogràfiques convencionals per a obtenir models 3D.
Sistema de Geoposicionament Global (GPS)	Posicionament X, Y i Z triangulat per un conjunt de satèl·lits. Exigeix geoposicionar cada punt individualment.
Processat d'imatges de satèl·lit	Cada píxel de la imatge conté un valor numèric o nivell digital (ND), que fa referència a les seves qualitats visuals i permet deduir informació sobre el relleu.

Taula 2: *Noves tecnologies topogràfiques o NTT.* Elaborat a partir de Chuvieco (2000), Pozo-Ruz (2000), Slob i Hack (2004), Liu (2008) i Rodríguez (2012).

1.1 Objectius

Comprovar aquesta hipòtesi exigeix, en primer lloc, dissenyar una metodologia per calcular l'erosió del sòl amb les NTT disponibles. Això implica prendre una decisió respecte de quina tecnologia o conjunt de dades es fa servir i decidir quins són els procediments més adients per explotar-la. El primer objectiu del treball és, doncs, estructurar el procés de càlcul de l'erosió en funció de la tecnologia escollida. L'elecció d'una tècnica o l'altra implica una sèrie de conseqüències: una major o menor resolució disponible significaria canvis substancials en la fiabilitat dels MDE derivats, i un major nombre d'hores de treball de camp (v. g. si es feia servir tecnologia GPS) significaria poder dedicar menys temps al processament i l'anàlisi de les dades. Per tant, part d'aquest treball està dirigit a justificar l'elecció d'una tecnologia concreta enfront d'altres, en funció d'una casuística determinada (v. g. disponibilitat de dades, temporització i requeriments tècnics per tractar-les). En qualsevol cas, l'objectiu principal és posar de manifest la inexactitud que té l'adaptació dels models paramètrics d'erosió en vessants en malles d'alta resolució per dur a terme estudis a escala de parcel·la, per això s'han seleccionat dues parcel·les agrícoles a on s'ha calculat l'erosió amb NTT i s'ha comparat amb el mètode RUSLE.

2. Àrees d'estudi

2.1. Àrea d'estudi I - Vall d'en Marc

L'àrea d'estudi I té una extensió de 2,3 ha i s'ubica al terme municipal de Pollença, al Nord de l'illa de Mallorca. La Vall d'en Marc travessa longitudinalment la Serra de Tramuntana. El seu fons de vall, on es situa la parcel·la d'estudi, correspon a la plana al·luvial del Torrent de Sant Jordi. La conca abasta una àrea de 41,3 km² i la seva xarxa té una longitud total de 56,3 km. Es tracta, doncs, d'una xarxa ben drenada (amb una densitat de drenatge de 1,36 km/km²). La Serra de Ternelles tanca la conca al N, la Serra d'en Femenia ho fa al SW i la Serra de Sa Coma al Sud. Els tributaris més propers a l'àrea d'estudi són els Torrents de Mortitxet, Torrent de la Vall d'en Marc i, sobretot, el Torrent de Ternelles. Els materials són quaternaris (Gelabert, 1997), producte de la sedimentació d'argiles i la cimentació de graves, que formen conglomerats. Els sòls presents són fonamentalment cambisòls o *terra bruna* (Seguí et al., 1998), amb perfils A, B i C ben formats (Bech, 1976), però d'una maduresa relativa (Allaby i Allaby, 1990). Les dades de l'estació pluviometria B-760 (situada al nucli de Pollença) i B-006 (Ariant, municipi de Pollença) són complementàries ($R^2=0,96$) i indiquen, per a la sèrie temporal 1969-2005 una mitjana anual de 852,99 mm (fig. 3). Com succeeix a la resta de l'illa, el comportament de la precipitació és estacional, amb una estació seca a l'estiu i una humida entre el final de la tardor i el principi de l'hivern. La precipitació màxima enregistrada durant el període 2005-2010 va ser de 192mm el dia 10/11/2005. El sòl de la parcel·la té un ús agrícola, amb cultiu de garrover (*Ceratonia siliqua*) i ametller (*Prunus dulcis*), que es manté en tota la sèrie històrica analitzada (fig. 4). El que sí que canvia al llarg del temps és la densitat de la plantació d'arbres, fet que podria comportar interaccions importants sobre les taxes d'erosió. A més, com la resta de l'àrea rural del municipi, la parcel·la no es troba exempta de la influència de la rururbanització (Binimelis i Ordinas, 2012): a partir del 2008 s'aprecia en les fotografies aèries disponibles la construcció d'una casa amb jardí i piscina.

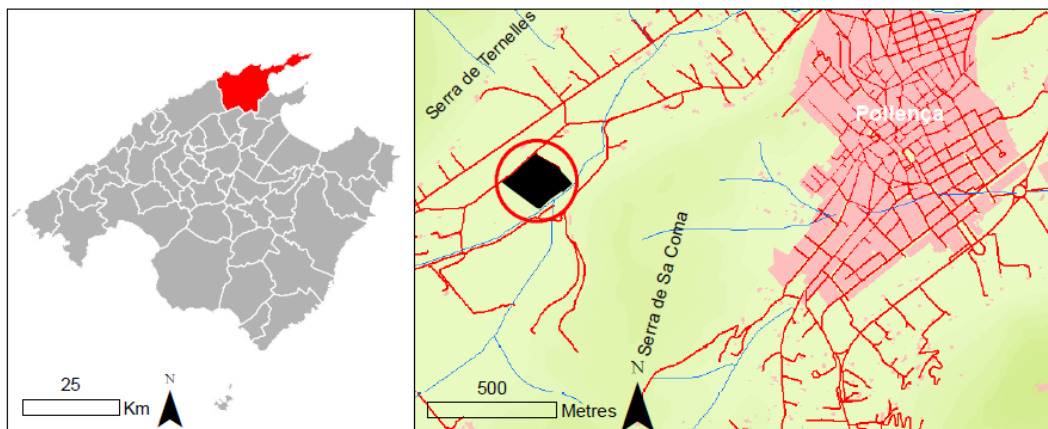


Figura 2: Localització de l'àrea d'estudi I. Fonts cartogràfiques: Cartociudad IGN, WMS 1.3.0 Hidrologia IDEIB

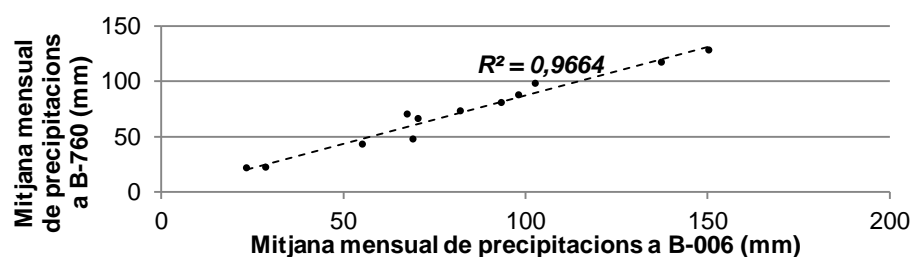


Figura 3: Correlació de la mitjana de precipitació mensual entre les estacions B-006 i B-760

Precipitacions a B-760 (1969-2005)	
Mitjana	852,99mm
Desv. Est.	34,02
Màxim	128,12mm (Novembre)
Mínim	21,2mm (Juliol)

Taula 3: Resum estadístic de les precipitacions mensuals a l'estació B-760 Pollença durant el període (1969-2005)

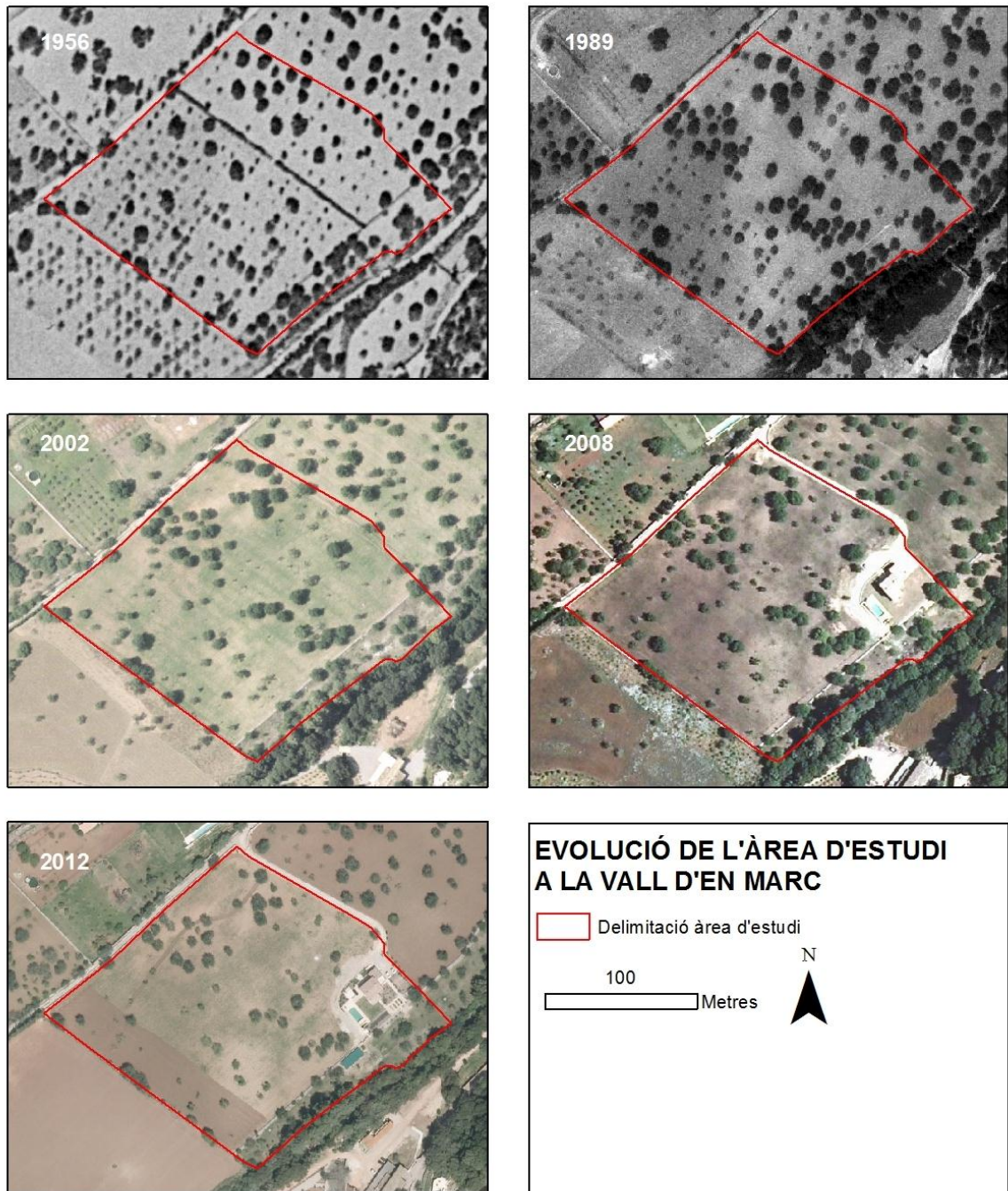


Figura 4: Evolució dels usos del sòl a l'àrea d'estudi I (Vall d'en Marc). Font cartogràfica: WMS Ortofotos IDEIB

2.2. Àrea d'estudi II - Vall de Sóller

L'àrea d'estudi II té una extensió de 0,25 ha i es troba a la Vall de Sóller, dins el sinclinal homònim, que travessa transversalment la Serra de Tramuntana i tanca al S la Serra d'Alfàbia (Colom, 1982). La vall es caracteritza per la presència d'afloraments massius del Mesozoic (Triàsic Superior i Juràssic Inferior). Els materials més antics corresponen a la fàcies Muschelkalk, però només es troben representats en les zones de ruptura dels encavalcaments. A la major part de la conca es troba una coberta superior de materials càrstics molt permeables i, per efecte de l'encavalcament, una interfície margosa (fàcies Keuper) impermeable, que per la seva mútua relació donen lloc a la formació de grans aquífers. La vall està drenada pel Torrent Major de Sóller i els seus tributaris Torrent des Coll, Torrent de Biniaraix i Torrent de Fornalutx. La conca té una superfície de 48,4 km² i la seva xarxa de drenatge té una longitud total de 99,5 km (v. g. es troba molt ben drenada). La seva forma és més compacta que la conca del Torrent de Sant Jordi (Àrea I), i per tant cal pressuposar una resposta més ràpida als episodis de precipitació. Les dades de les estacions B-061 i B-056 es complementen en un grau molt elevat ($R^2=0,98$), fet que permet construir una sèrie històrica prou ampla. Durant el període 1969-2009 la precipitació mitjana va ser de 838,3 mm/any, amb màxims semblants als registrats a l'àmbit de l'àrea d'estudi I (fig. 6). La precipitació màxima enregistrada durant el període 2005-2010 va ser de 194mm el dia 15/12/2008. L'àrea d'estudi II presenta una elevada densitat d'arbres fruiters fins a l'any 2006, quan es va portar a terme un guaret dins la parcel·la. En 2010 es va ressemar amb tarongers (*Citrus sinensis*), que encara mostren un port molt reduït. El context urbà és diferent del de l'àrea I, ja que la parcel·la es troba en una zona històricament habitada i propera al nucli tradicional de Sóller.

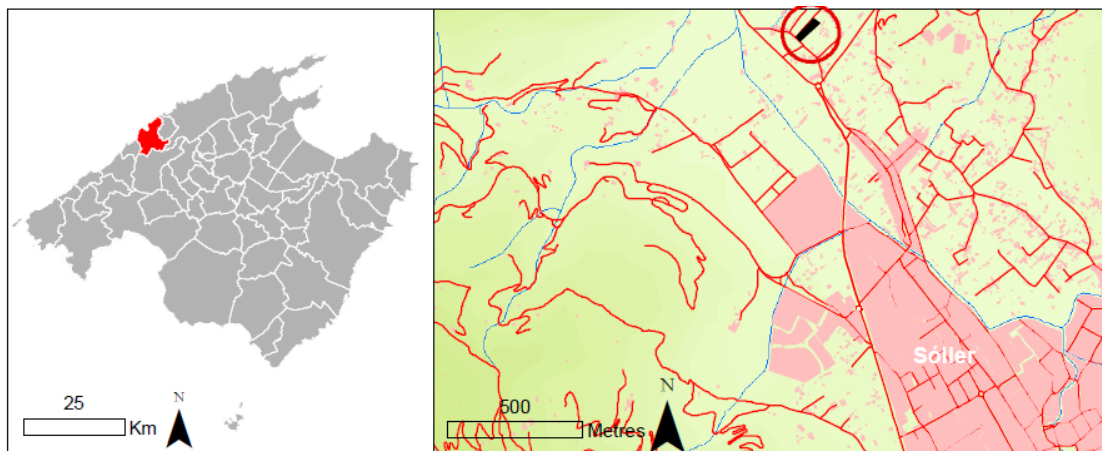


Figura 5: Localització de l'àrea d'estudi II. Fonts cartogràfiques: Cartociudad IGN, WMS 1.3.0 Hidrologia IDEIB

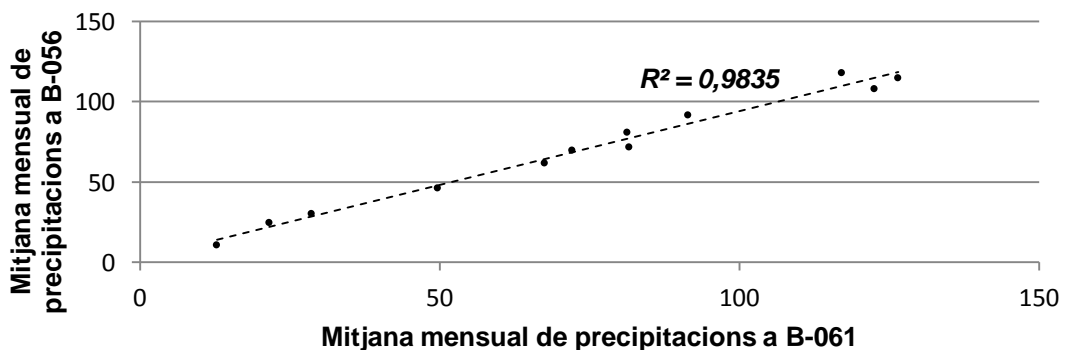


Figura 6: Correlació de la mitjana de precipitació mensual entre les estacions B-061 i B-056

Precipitacions a B-061 (1969-2009)

Mitjana	838,3mm
Desv. Est.	37,4
Màxim	122,2mm (Desembre)
Mínim	9,4mm (Juliol)

Taula 4: Resum estadístic de les precipitacions mensuals a l'estació B-061 Sóller durant el període (1969-2009)

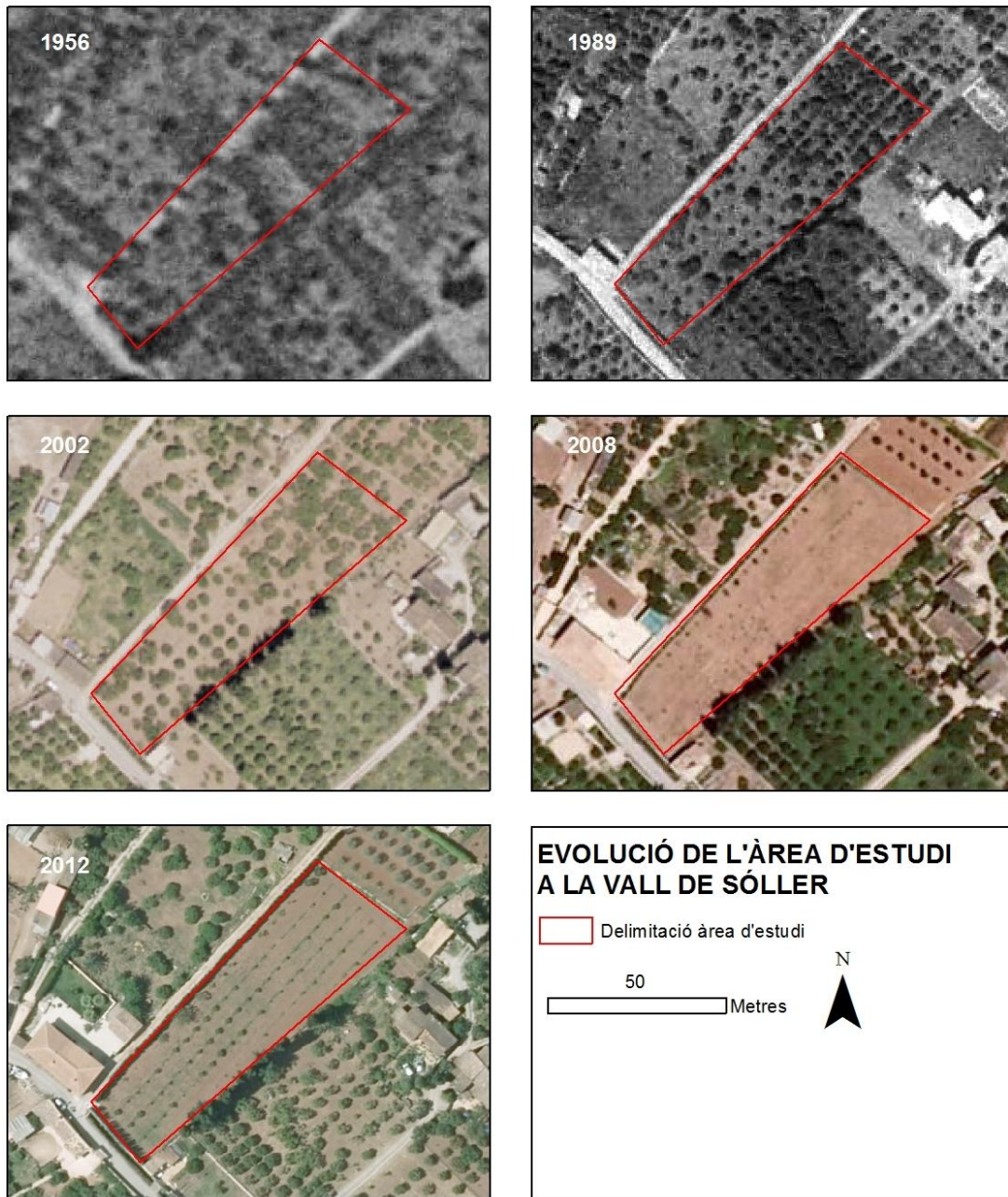


Figura 7: Evolució dels usos del sòl a l'àrea d'estudi II (Vall de Sóller). Fonts cartogràfica: WMS Ortofotos IDEIB

3. Materials

La possibilitat de disposar de dos conjunts de dades (anys 2005 i 2014) d'altimetria obtinguda mitjançant tecnologia ALS per a les dues àrees d'estudi comporta un avanç tècnic important en comparació amb altres estudis geomorfològics que s'han dut a terme fins ara a Mallorca. Es tracta del primer treball que explota els dos conjunts de dades per elaborar una comparació diacrònica de molt alta resolució de l'evolució morfològica dels vessants. El primer conjunt (2005) és el resultat d'un vol amb LiDAR aerotransportat que la Conselleria de Medi Ambient del Govern Balear va encarregar a l'Institut Cartogràfic de Catalunya per cartografiar les zones inundables de l'arxipèlag. El segon conjunt (2014) abasta tota la superfície de la comunitat autònoma i s'emmarca dins d'un conveni de col·laboració amb el PNOA. En tots dos casos es respecta l'error altimètric propi de la tecnologia LiDAR ($\pm 0,15\text{m}$) segons Castillo et al. (2014). L'error afegit ($\pm 0,5\text{m}$) potencialment induït per la presència de pendents importants o de vegetació és menyspreable a les dues àrees d'estudi, ja que ambdues presenten escàs pendent i densitat de vegetació. El tractament de les dades, per tal de generar els MDE i calcular els balanços sedimentaris, s'ha realitzat amb els programaris Fugro Viewer 3D i ArcMap.

4. Metodologia

4.1. Càlcul amb RUSLE

La versió revisada de la USLE (Renard et al., 1991) s'expressa segons la següent formulació, on A representa la pèrdua de sòl (en T ha⁻¹ any⁻¹), R el factor d'erosivitat de la pluja (en MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ any⁻¹), K el factor d'erosionabilitat del sòl (en T MJ⁻¹ h⁻¹ mm⁻¹), LS el factor de longitud-pendent del vessant (adimensional), C el factor de conservació del sòl (adimensional) i P el factor de les pràctiques de conservació del sòl (adimensional):

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

El model matemàtic s'ha implementat amb eines SIG, obtenint d'aquesta manera uns càlculs precisos, ràpids i directament comparables amb els obtinguts mitjançant els MDE. El factor R intenta explicar l'efecte que l'energia cinètica de la pluja té sobre el sòl, compactant i/o disgregant els seus materials superficials i transportant-los en forma d'escorriment superficial quan se supera la capacitat d'infiltració (González, 1991). La seva expressió matemàtica és la següent, on P_i representa la precipitació mensual (mm) i P la precipitació anual (mm):

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1,735 * 10 \left(1,5 \log_{10} \left(\frac{P_i^2}{P} \right) - 0,08188 \right)$$

S'han fet servir les mitjanes calculades a partir de les dades recopilades de les estacions B-006, B-720 (Àrea I), B-056 i B-061 (Àrea II). Mitasova et al. (1996) va proposar una equació modificada que tenia en compte l'àrea i no la longitud en el càlcul del factor LS. El seu avantatge principal és que permet crear una malla de dades contínues (ràster) que facilita el procés de càlcul amb eines SIG. La formulació original (Wishmeier i Smith, 1978) és la següent, on m i n són paràmetres donats, A_(r) representa l'àrea del vessant i B_(r) el pendent (en graus):

$$LS_{(r)} = (m+1) [A_{(r)} / 22,1]^m [\sin b_{(r)} / 0,09]^n$$

La versió per calcular el factor LS amb SIG, proposada per Mitasova et al. (1996) i formulada per Mitasova i Mitas (1999), fa servir la calculadora de ràster, segons la següent expressió, on F és l'acumulació de flux i S el pendent (els decimals s'expressen amb punts enlloc de comes, tal com ho fa el programari):

$$Power([flowacc] * resolution / 22.1, 0.6) * Power(Sin([slope] * 0.01745) / 0.09, 1.3)$$

El factor C té en consideració l'eficiència dels cultius i de la coberta vegetal en general per a protegir el sòl dels processos d'erosió. De manera exacta, s'expressa com la relació entre la pèrdua de sòl en una parcel·la amb un tipus determinat de vegetació i la pèrdua que tindria si estigués en una situació constant de guaret (Almorox et al., 2010). Els valors adoptats en aquest treball són els calculats per Ranzi et al. (2012; taula 5). El factor P fa referència a la relació que hi ha entre la quantitat de sòl perdut implementat una pràctica de conservació determinada i la que es perdria en cas de llaurar segons el màxim pendent. Els valors adoptats són els calculats per Pham (2007; taula 6). El factor K (d'erosionabilitat) quantifica la pèrdua de sòl per unitat d'erosivitat en una parcel·la estàndard. El càlcul d'aquest factor exigeix un ampli espectre empíric (Almorox et al., 2010). En aquest cas s'han fet servir els valors estimats per Vezina et al. (2006; taula 7).

Ús del sòl	Factor C
Sòl urbà/construït	0,0
Cultiu de secà	0,5
Cultiu de regadiu	0,18
Mescla de cultiu de secà i cultiu de regadiu	0,5
Cultiu/ Mosaic de pradera	0,5
Cultiu/ Mosaic de bosc	0,5
Pradera	0,18
Vegetació de sotabosc (matolls varis)	0,18
Mescla de pradera i vegetació de sotabosc	0,18
Sabana	0,18
Bosc caducifoli de fulla ampla	0,003
Bosc caducifoli de fulla d'agulla	0,003
Bosc perennifoli de fulla ampla	0,003
Bosc perennifoli de fulla d'agulla	0,003
Bosc mixt	0,003
Masses d'aigua	0,0
Pantà herbaci	0,18
Pantà boscós	0,003
Vegetació dispersa	0,18

Taula 5: Factor de la coberta vegetal (C) (adimensional) Font: Ranzi et al. (2012)

Pendent (%)	Plantes a Marjades	Plantes amb solcs
1-2	0.3	0.12
3-8	0.25	0.1
9-12	0.3	0.12
13-16	0.35	0.14
17-20	0.4	0.16
21-25	0.45	0.18

Taula 6: Factor de les pràctiques de conservació (P) (adimensional) Font: Pham (2007)

Tipus de sòl	Factor K
Fluvisòls	0.055
Regosòls	0.025
Leptosòls	0.028
Cambisòls	0.050
Alisòls	0.045
Phaozems	0.065

Taula 7: Factor de l'erosionabilitat del sòl (K) ($T MJ^{-1} h^{-1} mm^{-1}$) Font: Vezina et al. (2006)

4.2. Càlcul de l'erosió amb Noves Tecnologies Topogràfiques

El procediment metodològic per fer el càlcul amb NTT està estructurat en tres fases. La primera fase és per treure el model digital d'elevacions de 2005, amb les dades LiDAR-ALS. La segona per generar l'MDE actual i la darrera fase és en la que es du a terme la computació de les dades. A continuació es farà una descripció detallada de cada fase:

- **Fase 1:** El sensor làser emet i rep diferents ecos. El segon eco és el que arriba al sòl, per tant és el que interessa. La primera passa és seleccionar els punts del segon eco. La següent és seleccionar els punts que s'ubiquen dintre de la nostra àrea d'estudi. Un cop delimitats els punts, es procedeix a crear un MDE (0,25m x 0,25m) a través d'interpolació *Kriging*; perquè les dades del relleu siguin operables. Per a comprovar que les dades siguin el més precis possible es procedeix a calcular l'error del MDE. Per calcular-lo es realitza una *validació creuada*: la qual es basa en eliminar un punt del MDE, interpolat sense ell, fent així observable la desviació existent que genera l'eliminació el punt i per tant ens brinda l'oportunitat de predir l'error estadístic de la dada. Aquest procés es fa amb tots els punts del MDE.
- **Fase 2:** Es repeteix el procediment amb les dades del 2014
- **Fase 3:** La tercera fase és la fase de càlcul. S'aplicarà la fórmula que correspon al càlcul de la volumetria d'un prisma rectangular. Aquesta operació es realitzarà utilitzant la calculadora ràster. L'objectiu és determinar el volum de sòl que s'ha erosionat o sedimentat per unitat d'anàlisi. Per estimar l'error que té la mitjana calculada, es calcularà l'error estàndard.
 - $E = a \cdot \Delta Z$
 - On:
 - E és erosió
 - a és l'àrea del píxel
 - ΔZ és la variació de Z durant el període de temps

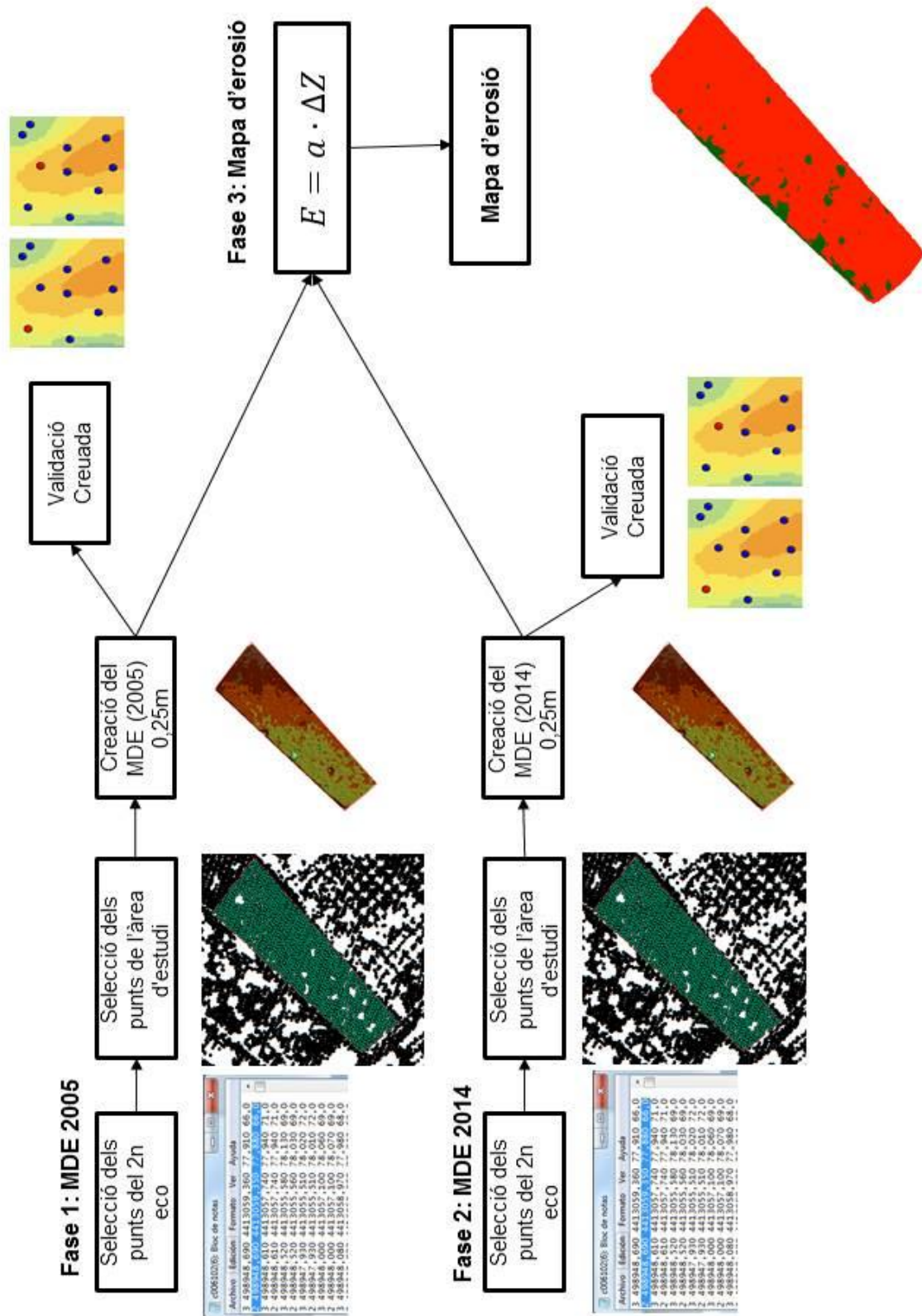


Figura 8: Model conceptual de la metodologia per calcular l'erosió amb NTT

5. Resultats

5.1. Models digitals d'elevació

Per tal de construir un model continu de dades, s'interpolen els valors del núvol de punts mitjançant un mètode geoestadístic d'estimació. El mètode utilitzat és el *Kriging*, que és el més habitual en el cas de mostres aleatoris (Chappell, 2010). Aquest mètode calcula el valor del píxel donant més pes als punts més propers obtenint resultats més fiables que amb altres mètodes d'interpolació. Però tendeix a suavitzar la variabilitat de les dades i per tant el model derivat ha de ser validat mitjançant la *validació creuada*. Es quantifica l'error quadràtic mitjà (Taula 8 i figs. 9 a,b,c,d) de tot el procés i s'incorpora al càlcul de l'error general de cada punt, juntament amb l'error generat durant la pressa de dades.

	Àrea I		Àrea II	
	% Error	SD	% Error	SD
MDE 05	0,01%	0,52	0,1%	0,09
MDE 14	0,07%	0,5	0,03%	0,07

Taula 8: Resultats de l'error dels MDE utilitzats

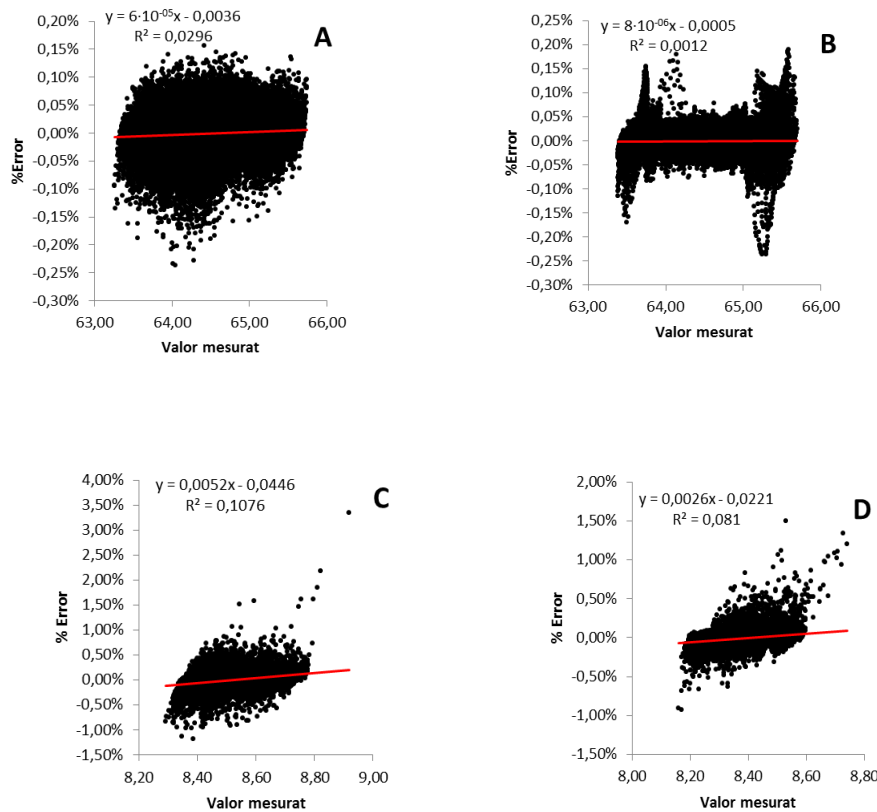


Figura 9: Relació de l'error amb el valor mesurat a) MDE (2005) de l'àrea d'estudi I b) MDE (2014) de l'àrea d'estudi I c) MDE (2005) de l'àrea d'estudi II d) MDE (2014) de l'àrea d'estudi II.

5.2. Balanç de sediment

5.2.1. Balanç de sediment calculat amb la RUSLE

Els mapes d'erosió (ME) generats han donat com a resultat, amb la mateixa resolució que amb les NTT, de $2,17 \text{ T ha}^{-1} \text{ any}^{-1}$ per a l'àrea d'estudi I i $0,005 \text{ T ha}^{-1} \text{ any}^{-1}$ per a l'àrea d'estudi II seguint la formulació de RUSLE. Una de les principals limitacions que té la RUSLE és que la seva base de dades està dissenyada per a pendents màxims d'un 16%. Al crear la malla amb píxels de reduïda dimensió ($0,0625\text{m}^2$) es generen valors de pendents molt elevades. L'única possible solució és engrandir la mida del píxel, però el que aconseguim així és perdre resolució.

5.2.2. Balanç de sediment calculat amb NTT

Els ME es generaren a partir dels MDE derivats de les dades LiDAR de 2005 i 2014. Es tracta, per tant, de dos sets de MDE per a cada àrea d'estudi, que s'han superposat amb l'objectiu de determinar les variacions d'altura i de volum de sediment per hectàrea entre les dues dates. Al ME de l'àrea I (fig. 11a) l'erosió es concentra al S, a la zona més elevada. De manera coherent, de l'observació del ME de l'àrea II (fig. 11b) es desprèn que la major part de l'erosió es concentra a la part més elevada de la parcel·la (NE), mentre que la sedimentació és major en una franja longitudinal paral·lela als límits occidentals de la mateixa, on es troba una petita paret de blocs de formigó d'uns 25 cm d'altura. L'anàlisi de les dades volumètriques (figs. 10a i 10b) indica que a l'àrea I la sedimentació durant el període 2005 és de $52,27 (\pm 0,08) \text{ T ha}^{-1} \text{ any}^{-1}$ l'erosió mitjana és de $-64,06 (\pm 0,03) \text{ T ha}^{-1} \text{ any}^{-1}$ i el balanç entre un procés i l'altre és d'una pèrdua d' $11,78 (\pm 0,11) \text{ T ha}^{-1} \text{ any}^{-1}$. A l'àrea II, el patró erosiu és més acusat: la sedimentació és de $73,34 (\pm 0,33) \text{ T ha}^{-1} \text{ any}^{-1}$, l'erosió de $164,6 (\pm 0,31) \text{ T ha}^{-1} \text{ any}^{-1}$ i el balanç sedimentari és negatiu de $91,26 (\pm 0,37) \text{ T ha}^{-1} \text{ any}^{-1}$. En relació a la superfície de cada parcel·la (fig. 12), podríem dir que a l'àrea I es perd una làmina de sòl de 0,16 cm i a l'àrea II d'1,43 cm en nou anys.

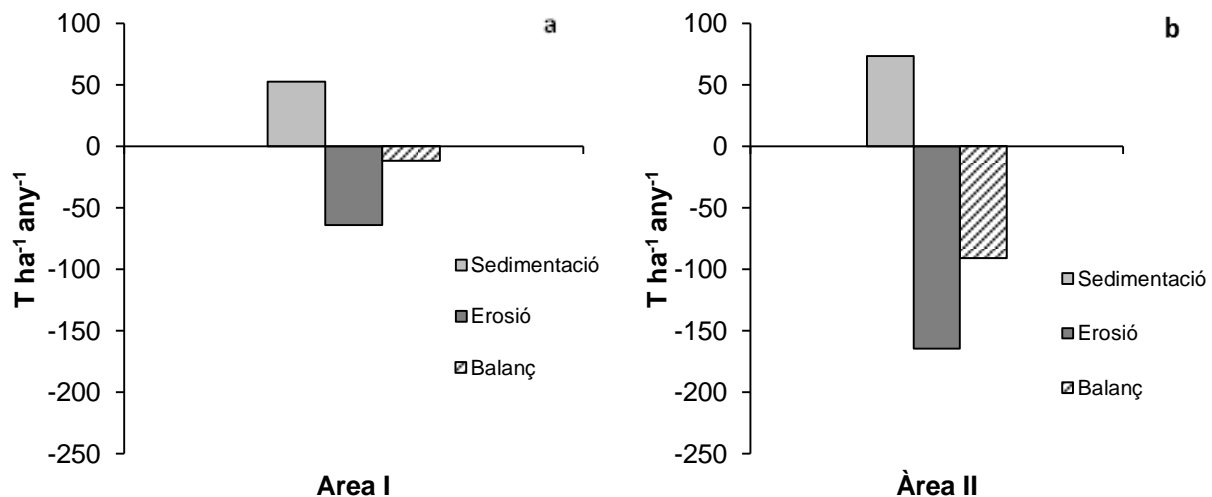


Figura 10: Balanç de sediment a) l'àrea d'estudi I b) l'àrea d'estudi II

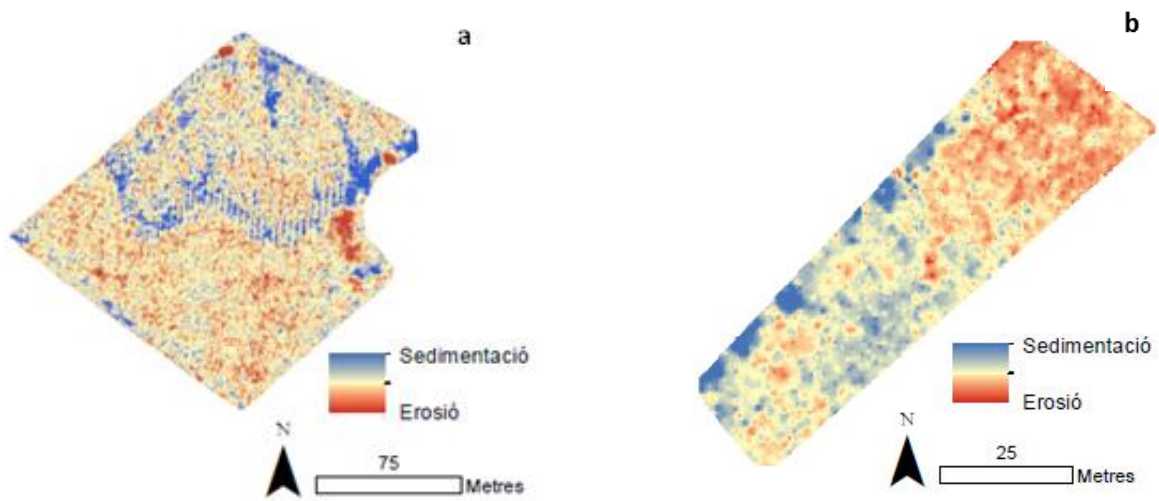


Figura 11: Mapa del balanç de sediment a) àrea d'estudi I a Vall den Marc b) àrea d'estudi II a la vall de Sóller

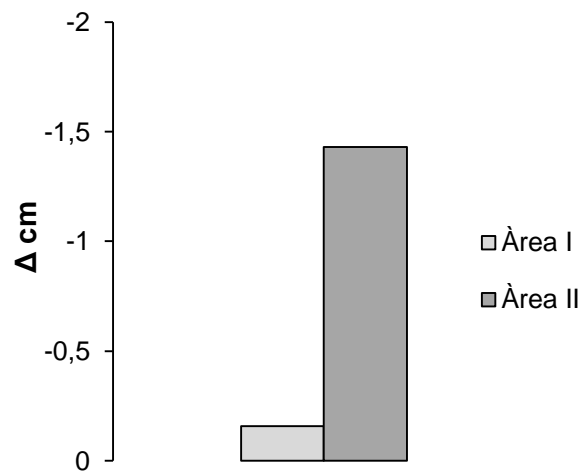


Figura 12: Variació de la làmina de sòl

5.3. Distribució de la sedimentació

Amb l'objectiu d'entendre la interacció que hi ha entre els obstacles físics del terreny i els patrons de sedimentació es van creuar les dades espacials dels ME de les dues parcel·les amb les àrees d'influència dels arbres a l'àrea I i la paret occidental a l'àrea II (figs. 13a i 13b). Els arbres de l'àrea I es van separar en tres classes en funció de la mida de la seva copa, determinant-se un buffer de 9 m pels més grans, 6 m pels de mida mitjana i 3 m pels més petits. El buffer de la paret de l'àrea II es va determinar en una distància de 3 m respecte de la paret. Els resultats indiquen que en el cas de l'àrea I els arbres retenen un 48,5% del volum de sediment acumulat durant el període analitzat. En el cas de l'àrea II, la paret reté un 86% del sediment.

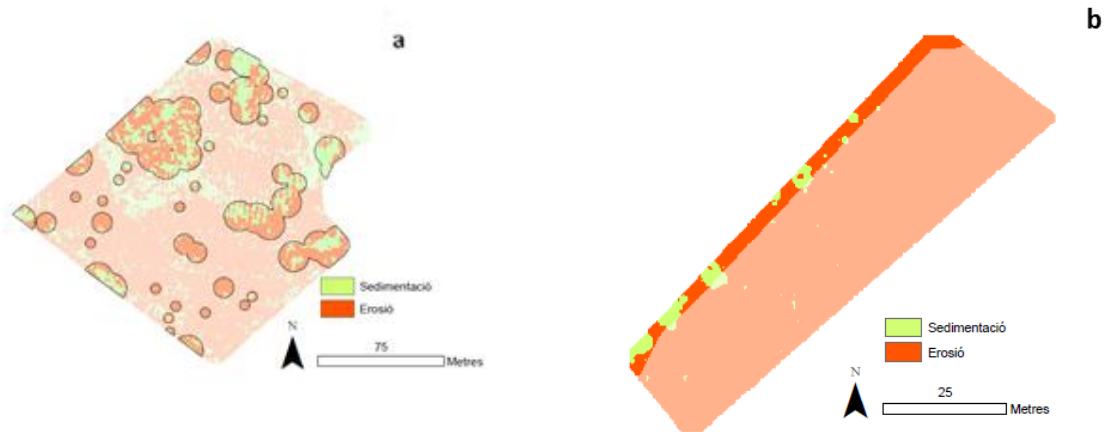


Figura 13: a) Mapa de representatiu de la sedimentació generada pels arbres b) Mapa representatiu per la sedimentació generada per la paret

5.4. Efecte del pendent

Els ME donen una idea molt il·lustrativa de com el major grau d'erosió es dona en totes dues parcel·les a les àrees més elevades. Però no resulta tan evident que el grau d'erosió sigui correlatiu amb el pendent. Per això es van analitzar les dades espacials del ME en relació al pendent (figs. 14a i 14b). En tots dos casos s'observa que la correlació és elevada i lineal, sempre en un sentit descendent: a mesura que disminueix el pendent minva també l'erosió.

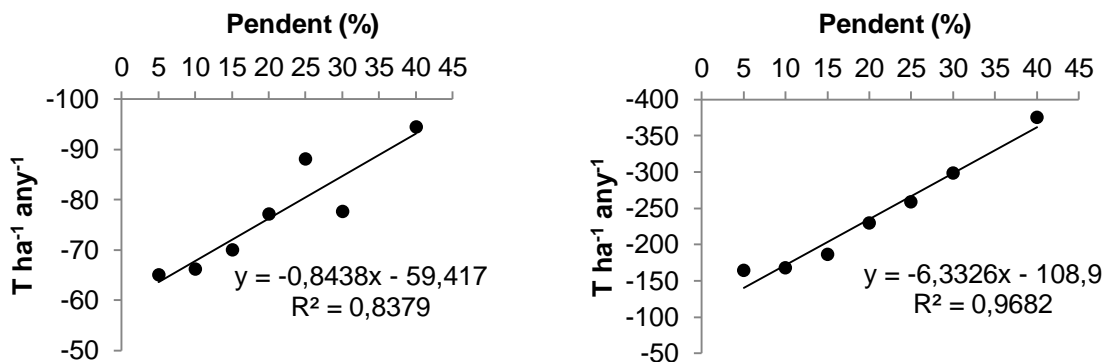


Figura 14: Relació entre la taxa d'erosió i el pendent a) àrea I b) àrea II

6. Discussió

6.1. Valoració dels mètodes utilitzats

Els cambisòls són un dels tipus de sòls d'elevada capacitat agrològica més estesos al món (Driessen i Deckers, 2001). En àrees de muntanya, la seva gènesi és deguda a l'ocurrència de cicles continus d'erosió i sedimentació (IUSS, 2007), ja que per la seva joventut els horitzons superficials retenen molts dels minerals procedents de la roca mare. Generalment es desenvolupen sobre terrenys amb superàvit hídric, però que permeten un bon drenatge de la descàrrega superficial. S'entén, doncs, que els cambisòls de les àrees muntanyoses de Mallorca, on el material calcari constitueix un bon substrat per al creixement orgànic, hagin estat històricament aprofitades com a terrenys agrícoles mitjançant tècniques com el cultiu en marjada i la construcció de parets de pedra als límits de les parcel·les, a l'estil *bocage*. Caracteritzar espacialment i temporalment els cicles d'erosió i sedimentació esdevé necessari per entendre l'evolució a llarg termini d'aquests espais de muntanya, sobretot actualment, quan molts d'ells estan patint els efectes de l'abandó de terrenys agrícoles per causa d'una creixent terciarització de l'economia (Weissteiner et al., 2011; Tarolli, 2014).

L'ús de la RUSLE en l'anàlisi evolutiva de parcel·les agrícoles comporta, en aquest sentit, algunes limitacions, especialment pel que fa a la resolució i objectivitat de les dades. La disponibilitat de dades altimètriques de gran resolució espacial i suficient resolució temporal comporta ara un avanç tècnic important en la quantificació dels balanços de sediment en escales d'anàlisi grans i permet fer un seguiment acurat de l'evolució morfològica de les parcel·les, servint potser com a models de l'evolució de tota la conca. Els seus avantatges sobre els models empírics d'erosió són evidents, com demostren els resultats d'aquest estudi. En determinar la RUSLE per als municipis de Pollença i Sóller s'han trobat valors notablement inferiors als calculats en els polígons de parcel·la corresponents a cada municipi (àrea I i àrea II, respectivament). Aquestes diferències es poden atribuir, en primer lloc, a una major adequació del model a l'àrea d'estudi. Els MDE derivats de les dades LiDAR ofereixen una resolució espacial de 25x25 cm per píxel, amb un marge d'error altimètric molt petit. La precisió dels models generats és molt elevada en qualsevol dels eixos de coordenades i, per tant, les dades de volumetria calculades (d'erosió i de sedimentació) també ho són.

El seu ús implica, per altra banda, evitar factors que tenen una gran influència sobre el cicle d'erosió-sedimentació, com ara l'extensió i tipus de cobertura vegetal, la persistència en la pràctica de mesures de conservació o el progrés de la morfologia dels vessants. La importància d'aquestes característiques és indubtable, però el seu seguiment era fins ara poc fiable i en la major part dels casos ho seguirà sent: com integrar de manera objectiva la influència de les pràctiques de conservació dins un model matemàtic? La variabilitat d'aquests factors és, a més, elevada, i depèn sovint de la interacció amb d'altres, que donen lloc a comportaments inesperats. L'anàlisi amb MDE de gran resolució permet evitar les dificultats inherents a tenir en compte aquests factors. Senzillament, quantifica l'altura del terreny i permet determinar diacrònicament el seu progrés positiu o negatiu (el grau de sedimentació o erosió per unitat d'anàlisi). És evident, a més, que en el futur aquests models progressaran cap a una major definició espacial, de manera que el marge d'error anirà minvant.

Però resulta també evident que ara per ara ja constitueixen una alternativa millor a la clàssica USLE (Wischmeier i Smith, 1978) i a la versió revisada i molt emprada RUSLE (Renard et al., 1991). Fins ara aquests havien estat els models d'erosió empírica més utilitzats per estudiar l'erosió laminar i en riell, degut a la seva facilitat d'ús (Alatorre i Beguería, 2009). Però exigeixen un ampli registre experimental (≈ 10.000 parcel·les en el cas de la USLE) per donar una certa validesa a la inferència estadística dels paràmetres emprats. A més, no tenen en compte els processos no lineals. La modelització amb LiDAR

permet defugir aquests dos inconvenients i tractar directament amb la realitat objectiva de la morfologia del terreny. Una crítica habitual als models empírics d'erosió ha estat precisament la seva escassa adequació a àmbits d'estudi de característiques físiques diferents a les de les parcel·les experimentals.

6.2. Pèrdua de sòl

Els valors d'erosió obtinguts en aquest estudi amb els models NTT són força superiors als extrets amb la RUSLE, fet que ens indicaria que potser fins ara la caracterització dels processos erosius en vessants havia estat massa prudent amb les xifres. Una quantificació més exacta ens apropa a una comprensió millor dels cicles d'erosió i de les dinàmiques dels vessants, i per tant les xifres han de ser el més precises possibles. Però els ME derivats de les dades LiDAR ens ofereixen un altre avantatge: ens permeten conèixer la distribució dels processos d'erosió i sedimentació dins la parcel·la i quantificar el volum de sediment acumulat (els models empírics només calculen l'erosió bruta de tota la parcel·la). Com ja s'ha indicat, la RUSLE no té en compte, de manera directa, la influència de processos no lineals sobre els patrons d'erosió-sedimentació. Considera, això sí, la presència i grau de cobertura vegetal, així com l'existència d'estructures físiques que contribueixen a conservar els sòls. Però, com veurem més endavant, l'efecte d'aquestes barreres físiques és molt més important del que pot semblar a priori.

En termes generals, totes dues parcel·les presenten un patró general comú: el procés de sedimentació es concentra a les parts més baixes dels vessants i el procés d'erosió a les parts altes. Això pot semblar lògic: el flux d'aigua erosiona les parts altes i es duu el sediment cap a les parts més baixes. Però la pèrdua de sediment a les parts altes i el rebliment de les parts baixes de la parcel·la indicarien que s'han alterat els perfils dels vessants durant el període 2004-2014. Resulta difícil aportar una explicació a aquest fet amb tants de factors implicats i sense comptar amb dades històriques que ens permetin analitzar l'evolució del patró sedimentari. Però pot estar relacionat amb un augment dels processos erosius degut a l'abandó de les activitats agrícoles. La formació de riells que canalitzen el flux cap als punts més baixos de la parcel·la és molt evident en els MDE. Les dades d'erosió bruta calculades a partir de la RUSLE indicarien que aquests processos són lleus a totes dues parcel·les (taula 9). Però les dades calculades a partir dels ME indiquen tot el contrari. Si la relació entre l'abandó agrícola i l'augment de l'erosió és de causa-efecte, la necessitat d'actuar esdevé més urgent, en ordre a preservar la utilitat del sòl com a recurs. I la solució no pot ser a escala de parcel·la, sinó de conjunt.

Pèrdues de sòl	Interpretació
0 T ha ⁻¹ any ⁻¹	Zones no susceptibles al procés erosiu, com poden ser espais urbans, carreteres, embassaments, etc.
0 a 5 T ha ⁻¹ any ⁻¹	Zones amb nivells d'erosió molt baixos i pèrdues de sòl tolerables. No hi ha erosió neta.
5 a 10 T ha ⁻¹ any ⁻¹	Zones amb nivells d'erosió baixos i pèrdues de sòl que poden ser tolerables. Probablement no hi ha erosió neta
10 a 25 T ha ⁻¹ any ⁻¹	Zones amb processos erosius lleus. Existeix erosió, però no és apreciable a simple vista
25 a 50 T ha ⁻¹ any ⁻¹	Zones amb processos erosius moderats. Existeix erosió, a pesar de que pot no ser apreciable a simple vista
50 a 100 T ha ⁻¹ any ⁻¹	Zones amb processos erosius greus. Existeix erosió i és apreciable a simple vista.
100 a 200 T ha ⁻¹ any ⁻¹	Zones amb processos erosius molt greus. Existeix erosió i és manifesta a simple vista
> 200 T ha ⁻¹ any ⁻¹	Zones amb processos erosius extrems. Existeix erosió i és evident a simple vista.

Taula 9: Taula interpretativa dels valors de pèrdua de sòl. Segons Edeso et al. (1997)

6.3. Efecte de les barreres físiques sobre la capacitat de retenció de sediment

Segons l'anàlisi de la distribució de sediment a les parcel·les, cal destacar l'efecte de concentració que provoquen les barreres físiques. A l'àrea d'estudi I destaca l'acció retentiva dels arbres, en dos sentits: a) augmenten la infiltració en demandar recursos hídrics al subsòl i, per tant, provoquen indirectament una minva en l'escolament superficial; b) les arrels fixen el sòl i dificulten el transport del sediment. A part de l'efecte retenidor, els arbres ajuden a millorar la qualitat del sòl, ja que incorporen residus orgànics propis als recursos minerals que ja transporta el sediment meteoritzat (Martínez et al., 2012). A l'àrea d'estudi II els arbres no són un factor representatiu, degut al seu escàs desenvolupament (s'han plantat fa poc temps i no s'han considerat un factor determinant com a element de retenció de sediment). Però crida l'atenció la funció retenidora que sí exerceix la paret ubicada a la part més deprimida de la parcel·la. Aquesta fixa el sediment guixat en suspensió i alhora redueix la velocitat del flux, afavorint la sedimentació del material més fi.

Tenint en compte la gran influència dels obstacles físics sobre els patrons de sedimentació, sembla lògic preguntar-se quin efecte tindran en un futur dos factors que cada cop semblen més rellevants i que estan intrínsecament relacionats amb el procés d'abandó agrícola: a) la colonització de vessants abandonats per vegetació oportunista, que pot induir indirectament a augmentar les taxes d'erosió (Forman i Godron, 1986); b) la falta de manteniment a la que es veuen sotmeses moltes de les solucions estructurals que va anar incorporant l'agricultura tradicional per aprofitar al màxim la capacitat de producció i conservació del recurs sòl i augmentar la productivitat agrícola (marges, parets, ratlles). Actualment, moltes d'aquestes construccions es troben en mal estat o abandonades, sense cap mena de gestió que garanteixi la seva persistència (Tarolli et al., 2014, 2015). El seu estat contribueix positivament a accelerar la velocitat del flux i les taxes d'erosió. A escala de parcel·la sembla que hi ha una gestió que promou el manteniment del recurs sòl. Però a escala de conca, probablement els processos d'abandó estan provocant una pèrdua general

de funcionalitat de les solucions estructurals i agrícoles tradicionals i augment generalitzat del ritme d'erosió.

6.4. Anàlisi comparatiu de les dues àrees d'estudi

Totes dues parcel·les presenten pendents mitjanes suaus i semblants (Àrea I: 4,88%; Àrea II: 3,45%). Però el balanç de sediment és molt diferent. Hi ha un component escalar a tenir en compte. La morfologia de la conca pot influir de manera molt rellevant en la manera com els fluxos d'aigua interactuen amb una petita porció de terreny. Per exemple si la disposició dels vessants fa que es canalitzin cap a un indret concret. Algunes àrees de la conca estan més aïllades de la xarxa de drenatge i per tant pateixen un menor grau d'erosió. Un altre factor a tenir en compte és el gradient d'altura entre l'àrea d'estudi i els punts més elevats de la conca, així com la distància que els separa. Si el gradient és elevat i la distància és curta, com succeeix a Sóller l'energia potencial de l'aigua que drena des de les muntanyes és major i per tant el flux és més veloç i té major capacitat d'erosió. Per tant es pot atribuir la divergència de resultats, en el balanç erosiu, a factors externs a la casuística pròpia de l'àrea d'estudi i que estan relacionats amb el context geogràfic.

7. Conclusions

La tecnologia LiDAR ofereix unes possibilitats fins ara inaccessibles. Això explica que els models paramètrics hagin estat el mètode més utilitzat per calcular l'erosió del sòl en parcel·les agrícoles. En aquest estudi s'ha comprovat que la hipòtesi plantejada, que les NTT permeten construir models d'erosió més acurats, és certa. El LiDAR genera un núvol de punts de gran resolució espacial i això permet tenir una quantitat major de dades i millorar la qualitat de la interpolació *Kriging*. Els models d'elevacions que se'n deriven presenten una resolució de fins a 25cm de píxel, molt superior a la que fins ara feien servir la majoria de geògrafs en els seus estudis (el MDE de major precisió ofert per l'IGN té una resolució de 5m de píxel). L'objectiu de construir una metodologia per calcular l'erosió amb NTT s'ha complert i els resultats secunden la presumpció que el MDE obtingut permetria fer un balanç sedimentari més fiable. En un futur, no molt llunyà, la disponibilitat d'una sèrie periòdica de dades LiDAR i una major capacitat de processament adquirida a causa dels avenços informàtics permetrà dur a terme un seguiment de l'evolució de l'erosió a diferents escales tant de parcel·la com de conca. La seva importància es justifica sobretot per dos motius: 1) entendre els cicles d'erosió i el seu ritme a la nostra illa 2) comprendre els efectes que l'abandó agrícola pot provocar sobre els vessants i comprovar la seva influència en les taxes d'erosió.

Bibliografia

- Alatorre, L. C.; Beguería, S. (2009) Los modelos de erosión: una revisión. *Cuaternario y geomorfología*, 23(1-2), 29-48.
- Allaby, A.; Allaby, M. (1990) *The Concise Oxford Dictionary of Earth Science*. Oxford University Press. p. 410.
- Almorox, J.; Bermúdez, F. L.; Rafaelli, S. (2010) *La degradación de los suelos por erosión hídrica. Métodos de estimación*. Ediciones de la Universidad de Murcia. 384p.
- Bech, J (1976) Sinopsi dels sòls dels Països Catalans. *Butlletí de la Institució Catalana d'Història Natural*, 40, 31-44.
- Binimelis, J.; Ordinas, A. (2012) Paisatge i canvi territorial en el món rural de les Illes Balears. *Territoris*, 8, 11-28.
- Brasington J.; Smart, R. M. A (2003). Close range digital photogrammetric analysis of experimental drainage basin evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, 231–247.
- Brasington, J.; Rumsby, B. T.; Mcvey, R. A. (2000). Monitoring and modeling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution GPS-based survey. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 973–990.
- Brasington, J.; Vericat, D.; Rychkov, I. (2012) Modeling river bed morphology, roughness, and surface sedimentology using high resolution terrestrial laser scanning. *Water resources research*, 48, 1-18.
- Castillo, W. E. S.; Hernández, C. U. P.; Becerra, X. M.; Cortina, F. G. (2014) Evaluación de la exactitud posicional vertical de una nube de puntos topográficos LIDAR usando topografía convencional como referencia. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 85, 5-17.
- Chappell, A. (2010) *An Introduction to Geostatistics*. A: Clifford, N.; French, S.; Valentine, G. *Key methods in geography* (Eds.) 2ª edició. Sage: Londres; 374-313.
- Chuvieco, E. (2000) *Fundamentos de Teledetección espacial*. 3ª edición. Rialp: Madrid. p. 568.
- Colom, G. (1982) *Geomorfología de Mallorca: el relieve y la forma de sus montañas*. Gráficas Miramar: Palma. p. 165.
- Desconegut (2005) Informe proyecto MDT LIDAR de las zonas inundables de las Islas Baleares. *Institut Cartogràfic de Catalunya*: Barcelona. p. 146.
- Driessen, P. i Deckers, J. (2001). *Lecture Notes On the Major Soils of the World*, Roma: FAO.
- Edeso, J.M.; Marauri, P.; Merino, A.; González, M.J. (1997) Determinación de la tasa de erosión hídrica en función del manejo forestal: la cuenca del río Santa Lucía (Gipuzkoa). *Lurralde*, 20, 67-104.
- Felicísimo, Á. M. (1994). *Modelos digitales del terreno*. Pentalfa: Oviedo. p. 118.
- Forman, R. i Godron, M.(1986) *Landscape Ecology*, Oxford: Wiley.
- Gelabert, B. (1997) *La estructura geológica de la mitad occidental de la isla de Mallorca*. IGME: Madrid. p. 129.
- González, M. (1991) La ecuación universal de pérdidas de suelo. Pasado, presente y futuro. *Ecología*, 5, 13-50.

- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological society of America bulletin*, 56(3), 275-370.
- Hudson, N. (1993) Field measurement of soil erosion and runoff. *FAO Roma and Silsoe associates*. Belford UK Disponible a: <http://www.fao.org/docrep/T0848E/t0848e00.htm#TopOfPage>
- IUSS (2007). *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo*, Roma: FAO.
- Liu, X. (2008) Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. *Progress in Physical Geography*, 32, 31–49.
- Martínez, J. R. F., Tejero, I. G., Panadero, L. A., & Raya, A. M. (2012). Mitigación de la erosión de suelos en plantaciones de almendro por cubiertas vegetales: implicaciones para la agricultura sostenible de montaña (SE España). *Comunicata Scientiae*, 3(2), 123-129.
- Mitasova, H., J. Hofierka, M. Zlocha, L.R. Iverson (1996) Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS Int. *Journal of Geographical Information Science*, 10(5), 629-641.
- Mitasova, H.; Mitas, L. (1999) Modelling soil detachment with RUSLE 3d using GIS. *Geographic Modeling Systems Laboratory*. Disponible a: <http://skagit.meas.ncsu.edu/~helena/gmslab/erosion/usle.html>
- MOPT (1992). *Guía para la elaboración de estudios del medio físico*. Monografías de la Secretaría de Estado para las Políticas del Agua y del Medio Ambiente. Madrid España. 478 p.
- Musgrave, G. (1947) The quantitative evaluation of factors in water erosion. A first approximation. *Journal Soil and Water Conservation*, 2, 133-138.
- Pham, H. (2007) Evaluating Potential of Soil Loss Erosion in the Ba Be Lake Basin in Vietnam, *Project, Hanoi-Vietnam*.
- Pozo-Ruz, A. Ribeiro, A.; García-Alegre, M. C.; García, L.; Guinea, D.; Sandoval, F. (2000). Sistema de Posicionamiento Global (GPS): Descripción, Análisis de Errores, Aplicaciones y Futuro. *ETS Ingenieros de Telecomunicaciones*. Universidad de Málaga, 1-9.
- Ranzi, R., Le, T. H.; Rulli, M. C. (2012). A RUSLE approach to model suspended sediment load in the Lo river (Vietnam): Effects of reservoirs and land use changes. *Journal of Hydrology*, 422, 17-29.
- Renard, K.; Foster, G. R.; Weesies, G. A.; Porter, J. P (1991) RUSLE Revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46, 30-33.
- Rodríguez, P. (2012) La fotogrametría digital automatizada frente a los sistemas basados en sensores 3D activos. *Revista EGA*, 19, 101-111.
- Seguí, J. M. (1998) *Atlas de les Illes Balears*. Govern de les Illes Balears - Obra social Sa Nostra - Universitat de les Illes Balears: Palma. Disponible a: <http://www.uib.cat/secc6/lsig/Atles/INICI.HTM>
- Slob, S.; Hack, R. (2004) 3D terrestrial laser scanning as a new field measurement and monitoring technique. A: Hack, R., Azzam, R., Charlier, R. (Eds), *A European perspective. Lecture notes in earth sciences*. Núm. 104. Springer: Berlin, New York, 79-189.
- Smith, D. (1958) Factors affecting rainfall erosion and their evaluation. *International association of hydrological sciences publication*, 43, 97-107.

- Tarolli, P. (2014). High-resolution topography for understanding Earth surface processes: opportunities and challenges. *Geomorphology*, 216, 295-312.
- Tarolli, P., Preti, F., & Romano, N. (2014). Terraced landscapes: from an old best practice to a potential hazard for soil degradation due to land abandonment. *Anthropocene*, 6, 10-25.
- Tarolli, P.; Sofia, G.; Calligaro, S.; Prosdocimi, M.; Preti, F.; Dalla-Fontana, G. (2015). Vineyards in terraced landscapes: new opportunities from LiDAR data. *Land Degradation and Development*, 26, 92-102.
- Vericat, D. Smith, M. W.; Brasington, J. (2014): Patterns of topographic change in sub-humid badlands determined by high resolution multi-temporal topographic surveys. *Catena*, 120, 164-176.
- Vezina, K.; Bonn, F.; Van, C. P. (2006). Agricultural land-use patterns and soil erosion vulnerability of watershed units in Vietnam's northern highlands. *Landscape ecology*, 21(8), 1311-1325.
- Weissteiner, C. J., Boschetti, M., Böttcher, K., Carrara, P., Bordogna, G., Brivio, P. A. (2011). Spatial explicit assessment of rural land abandonment in the Mediterranean area. *Global and Planetary Change*, 79(1), 20-36.
- Wheaton, J.M.; Brasington, J.; Darby, S. E.; Sear, D. A. (2010). Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 136–156.
- Wischmeier, W.; Smith, D. (1962) Soil loss estimation as a tool in soil and water management planning». *International association of hydrological sciences publication*, 59, 148-159.
- Wischmeier, W.; Smith, D. (1978) *Predicting rainfall erosion losses*. USDA Handbook, p. 537.
- Zing, A. (1940) Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff. *Agricultural Engineering*, 21, 59-64.