

## REFLEXÃO SOBRE AS ABORDAGENS GEOESPACIAIS DA INVESTIGAÇÃO GEOGRÁFICA APLICADAS À MODELAÇÃO DOS SISTEMAS AGRÍCOLAS

CLÁUDIA M. VIANA <sup>1,2</sup> 

**RESUMO** – No centro das iniciativas globais, várias abordagens estão a ser discutidas e reorientadas para alcançar os objetivos globais de produção e segurança alimentar para as gerações presentes e futuras. No entanto, os sistemas agrícolas, que são a principal fonte biogeofísica para garantir os benefícios nutricionais e a segurança alimentar global, têm sofrido alterações ao longo do tempo. Nas próximas décadas, estes sistemas enfrentarão desafios complexos associados, por exemplo, à mudança no padrão de consumo alimentar, às alterações climáticas, ao abandono e/ou a intensificação do uso dos solos. A capacidade destes no apoio à segurança alimentar global será determinada pela sua eficiência, sustentabilidade e equidade. Com a integração de abordagens geoespaciais da investigação geográfica existe uma oportunidade prática para modelar os sistemas agrícolas, o que por sua vez, poderá contribuir para obter novos dados que auxiliem nos processos de tomada de decisão, antecipação de mudanças futuras e projeção de estratégias robustas a longo prazo para gerir os desafios iminentes. Este artigo apresenta uma reflexão dos avanços no desenvolvimento e integração de análises espaciais, dados geoespaciais e modelos de simulação no campo dos sistemas agrícolas, destacando e exemplificando diferentes técnicas de modelação e tecnologias geoespaciais no apoio às necessidades de investigação atuais e futuras.

**Palavras-chave:** Análise espacial; solos agrícolas; segurança alimentar; fontes históricas; estatísticas agrícolas.

**ABSTRACT** – REFLECTION ON GEOSPATIAL APPROACHES TO GEOGRAPHIC RESEARCH APPLIED TO THE MODELING OF AGRICULTURAL SYSTEMS. At the center of global initiatives, various approaches are being discussed and realigned to achieve global objectives for production and food security for the present and future generations. However, agricultural systems, which are the main biogeophysical source for ensuring nutritional benefits and global food security, undergo changes over time. In the coming decades, these systems will face complex challenges, for example, associated with changes in food consumption patterns, climate change, land abandonment and/or intensification of land use. The ability of these systems to support global food security will be determined by their efficiency, sustainability, and equity. The integration of geospatial approaches to geographical research offers a practical opportunity to model agricultural systems, which, in turn, can contribute to obtain new data that assist in decision-making processes, anticipating future changes, and projecting long-term robust strategies to manage imminent challenges. This article presents a reflection on the development and integration of spatial analysis, geospatial data, and simulation models in the field of agricultural systems, highlighting and exemplifying different modeling techniques and geospatial technologies to support current and future research needs.

**Keywords:** Spatial analysis; agricultural land; food security; historical sources; agricultural statistics.

**RESUMEN** – REFLEXIÓN SOBRE ENFOQUES GEOESPACIALES A LA INVESTIGACIÓN GEOGRÁFICA APLICADA A LA MODELACIÓN DE SISTEMAS AGRÍCOLAS. En el centro de las iniciativas globales, se están discutiendo y reorientando varios enfoques para lograr objetivos globales de producción y seguridad de alimentos para las generaciones presentes y futuras. Sin embargo, los sistemas agrícolas, que son la principal fuente biogeofísica para garantizar los beneficios nutricionales y la seguridad alimentaria mundial, han sufrido cambios con el tiempo. En las próximas décadas, estos sistemas enfrentarán desafíos complejos asociados con, por ejemplo, cambios en los patrones de consumo de alimentos, cambio climático, abandono y/o intensificación del uso de la tierra. Su capacidad para apoyar la seguridad alimentaria mundial estará determinada por su eficiencia, sostenibilidad y equidad. Con la integración de enfoques geoespaciales a la investigación geográfica existe una oportunidad práctica para modelar sistemas agrícolas, lo que, a su vez, podría contribuir a la obtención de nuevos datos que ayuden en los procesos de toma de decisiones, anticipación de cambios futuros y proyección de estrategias sólidas a largo plazo, gestionar desafíos inminentes. Este artículo presenta una reflexión sobre los avances en el desarrollo y la integración de análisis espaciales, datos geoespaciales y modelos de simulación en el campo de los sistemas agrícolas, destacando y ejemplificando diferentes técnicas de modelado y tecnologías geoespaciales en apoyo de las necesidades de investigación actuales y futuras.

Recebido: 31/10/2023. Aceite: 17/12/2023. Publicado: 22/12/2023.

<sup>1</sup> Centro de Estudos Geográficos, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Rua Branca Edmée Marques, 1600-276, Lisboa, Portugal. E-mail: [claudiaviana@edu.ulisboa.pt](mailto:claudiaviana@edu.ulisboa.pt)

<sup>2</sup> Laboratório Associado TERRA, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.

**Palavras chave:** Análisis espacial; suelos agrícolas; seguridad alimentaria; fuentes históricas; estadísticas agrícolas.

## I. INTRODUÇÃO

Garantir a segurança alimentar global é um desafio indiscutível do século XXI. A agenda da segurança alimentar global exige esforços internacionais urgentes baseados em estratégias eficazes para enfrentar os desafios complexos de cada região associados, por exemplo, à mudança no padrão de consumo alimentar, às alterações climáticas e ao abandono e/ou a intensificação do uso dos solos (Foley *et al.*, 2011; Rocha *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2014). Especificamente, os sistemas agrícolas são a principal fonte biogeofísica que garante os benefícios nutricionais e a segurança alimentar e ainda uma variedade de serviços ambientais, culturais e sociais, especialmente quando a agricultura é praticada de forma sustentável (Scown *et al.*, 2019; Stephens *et al.*, 2018). São, portanto, indispensáveis para garantir a segurança alimentar futura e alcançar as metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), e.g., na redução da pobreza (ODS 1) e no aumento do bem-estar da população (ODS 3) (Avtar *et al.*, 2020; Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura [FAO], 2017; Viana *et al.*, 2022).

Apesar do uso agrícola ainda ser predominante na Europa (48%), entre 1900 e 2010, aproximadamente 38% destes solos foram perdidos para outros usos, enquanto apenas cerca de 29% foram ganhos (Fuchs *et al.*, 2015). A mesma tendência tem sido observada em Portugal, onde ocorreram mudanças substanciais na dinâmica dos sistemas agrícolas nas últimas décadas (Freire & Lains, 2015, 2017; Medeiros, 2009). Em 1875, estimava-se que os solos de uso agrícola cobriam cerca de 21% de Portugal continental; de 1902 a 1907, houve um aumento para 35% (Medeiros, 2009). Estes continuaram a aumentar com a campanha do trigo, que começou com a legislação de 1889 e a política do trigo em 1929. Em 1956, estimava-se que esta proporção aumentou para 54% dos solos (Medeiros, 2009).

Em Portugal, para além das características naturais e socioeconómicas que têm impactado as zonas rurais e as atividades agrícolas ao longo do último século, os solos de uso agrícola estiveram quase sempre condicionados às principais tendências das políticas públicas e das autoridades nacionais (Ferreira, 2001). Uma das políticas e medidas foi a adesão de Portugal à União Europeia, em 1986, que marcou o início da aplicação da Política Agrícola Comum (PAC). Desde então, a evolução da agricultura portuguesa tem estado intrinsecamente ligada à evolução da PAC, nos seus pressupostos básicos e nos instrumentos de aplicação prática. De acordo com os dados oficiais da Direção-Geral do Território (DGT), entre 1995 e 2007, cerca de 4,3% dos solos de uso agrícola foram perdidos para outros usos. Até 2015, a tendência foi uma diminuição destes solos: os últimos dados de 2018 indicam uma cobertura de cerca de 41% dos solos de Portugal continental (DGT, 2018).

Assim, um dos principais desafios atuais dos sistemas agrícolas está associado às constantes transformações registadas nas últimas décadas, desde a alteração do uso destes solos por outros tipos de uso (Foley *et al.*, 2011; Radwan *et al.*, 2019), ao abandono destes solos (Castillo *et al.*, 2021; MacDonald *et al.*, 2000), e ao seu uso intensificado (Lambin *et al.*, 2000; Olesen *et al.*, 2011). Todas estas transformações indiretamente influenciam a produção global de alimentos e os objetivos da segurança alimentar global. Como resultado, os sistemas agrícolas enfrentarão numerosos desafios nas próximas décadas, e a capacidade destes no apoio à segurança alimentar global será determinada pela sua eficiência, sustentabilidade e equidade (Kastner *et al.*, 2012; Nelson *et al.*, 2010). Por esta razão, a capacidade de integrar abordagens geoespaciais da investigação geográfica para mapear, monitorizar, quantificar e modelar as dinâmicas dos sistemas agrícolas torna-se fundamental para a antecipação de mudanças futuras e projeção de estratégias robustas a longo prazo de forma a gerir os desafios iminentes. Neste artigo, explora-se os avanços no desenvolvimento e integração de análises espaciais, dados geoespaciais e modelos no campo dos sistemas agrícolas, sintetizando a diversidade disciplinar do conhecimento científico disponível e indicando o caminho para atuais e futuras investigações.

## II. CONTEXTO HISTÓRICO DA MODELAÇÃO DOS SISTEMAS AGRÍCOLAS

Os sistemas agrícolas são considerados sistemas naturais modificados pela atividade humana com o principal propósito de suportar a produção de gado e produtos agrícolas (desde alimentos para consumo humano, alimentos para consumo animal, para produção de fibras e energia) (Dillon & McConnell, 1997). Um sistema agrícola pode ser considerado como um sistema adaptativo complexo com um conjunto de componentes interconectados, incluindo componentes físicos, culturais, sociais, comportamentais, políticos e económicos, e todos interagem não linearmente no espaço e no tempo (Dillon & McConnell, 1997; Verburg *et al.*, 2015). Assim, elementos como não-linearidade, espaço-temporalidade, emergência, auto-organização e auto-similaridade podem ser usados para descrever os sistemas agrícolas (Antle *et al.*, 2017; Müller *et al.*, 2020).

Dadas as características complexas dos sistemas agrícolas e a sua importância para a vida humana, um número crescente de investigadores, a partir de diferentes perspetivas disciplinares, têm dedicado os seus estudos a esta temática (Jones *et al.*, 2016). Embora, em 1826, von Thünen tenha desenvolvido um dos primeiros modelos relacionados aos solos de uso agrícola e à importância da localização espacial (também conhecida como teoria da localização), um novo progresso importante no desenvolvimento e aplicação de modelos no campo dos sistemas agrícolas só ocorreu na década de 1950. Durante esta década, Earl Heady (1957) publicou um dos primeiros trabalhos sobre modelação de sistemas agrícolas onde tentou maximizar as decisões em escala e avaliar os efeitos das políticas públicas. Posteriormente, Dent e Blackie (1979) publicaram um livro que incluía modelos agrícolas económicos e biológicos. Nesta mesma década, o *International Biological Program* (IBP) incentivou cientistas de diferentes disciplinas a contribuir para o desenvolvimento e aplicação de modelos no campo dos sistemas agrícolas (Worthington, 1975). No final da década de 1960, Duncan *et al.* (1967) desenvolveram um modelo de simulação da fotossíntese da copa de diferentes produtos agrícolas (milho, algodão e amendoim). Em 1974, a FAO desenvolveu um modelo de avaliação do uso do solo integrando variáveis relativas ao solo, clima, vegetação e de carácter socioeconómico (FAO, 1976). Entre 1982 e 1986, foram desenvolvidos nos Estados Unidos diferentes modelos para simular a produção de grandes culturas como o milho e o trigo (CERES-Wheat, CERES-Maise) (Wilkerson *et al.*, 1983). Na década de 1990, foram desenvolvidos modelos agrícolas e económicos para estudar o impacto potencial das alterações climáticas nos sistemas agrícolas (Curry *et al.*, 1990; Rosenzweig & Parry, 1994).

Entre as décadas de 1990 e 2000, foram apresentados modelos matemáticos direcionados para as doenças das culturas agrícolas, dos animais e de pragas de insetos (Delgado *et al.*, 2016; Freer *et al.*, 1997; Jones *et al.*, 2003). Tanure *et al.* (2015) desenvolveram um modelo matemático para a gestão dos solos de uso agrícola. Recentemente, Jones *et al.* (2016) elaboraram uma síntese da história da modelação dos sistemas agrícolas e das necessidades de investigação atuais e futuras. Os mesmos autores também analisaram o estado atual da modelação dos sistemas agrícolas, com foco na aplicabilidade de diferentes modelos (Jones *et al.*, 2017). Em ambos os trabalhos, os autores concluíram que a modelação dos sistemas agrícolas tem sido promovida para diferentes fins em todas as disciplinas das ciências agrícolas e que o reforço das abordagens de modelação está relacionado principalmente com o desenvolvimento de técnicas matemáticas e estatísticas (Jones *et al.*, 2016, 2017).

Recentemente, Viana *et al.* (2022) apresentaram os resultados de uma revisão da literatura focada na relação entre o funcionamento dos sistemas agrícolas e o aumento da segurança alimentar, procedendo à sistematização dos principais campos de pesquisa e à apresentação de uma síntese da diversidade disciplinar e temática do conhecimento científico publicado em revistas de referência entre 1991 e 2019 (fig. 1). A análise revelou que a maioria dos artigos (77% dos 260 artigos) foi publicada entre 2010 e 2019, espelhando a recente relevância adquirida pelas temáticas agrícolas e alimentares, juntamente com análises em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), incluindo abordagens na área do mapeamento, monitorização, quantificação, modelação e simulação das dinâmicas dos sistemas agrícolas. Os autores verificaram que os países desenvolvidos da América, Europa e Oceânia têm recebido menos atenção dos cientistas do que Ásia (36%) e África (20%), onde decorreu a maior parte dos estudos de caso, o que indica que as questões alimentares nestes continentes tendem a ser vistas como fulcrais. Durante os cerca de 30 anos estudados, a maior parte da investigação esteve centrada em seis campos principais: mudanças no uso do solo (28%), eficiência dos sistemas agrícolas (27%), mudança climática (16%), motivações do agricultor (12%), agricultura urbana e periurbana (11%) e adequação do solo (7%). Nos anos 1990, os campos mais proeminentes

foram a eficiência dos solos agrícolas, agricultura urbana e periurbana e impactos das mudanças climáticas. Mas, durante a primeira década do século XXI, os outros campos começaram a ganhar proeminência. Os autores constataram que cada campo de pesquisa é diversificado e altamente importante para o desenvolvimento global de longo prazo, fornecendo abordagens disciplinarmente transversais para diferentes contextos geográficos.

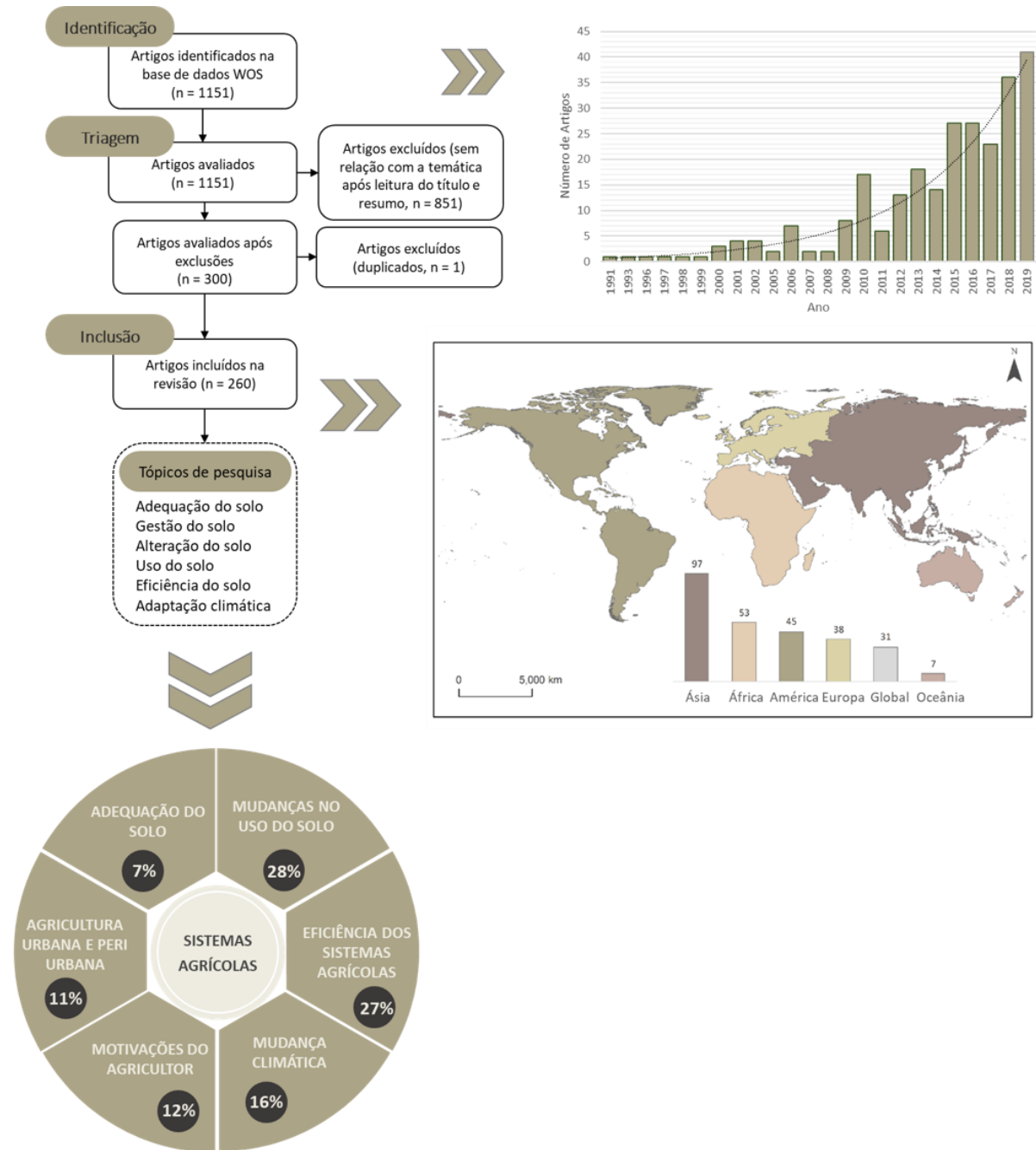


Fig. 1 – Revisão sistemática das contribuições dos diferentes estudos sobre sistemas agrícolas. Figura a cores disponível online.

Fig. 1 – Systematic review of the contributions of different studies on agricultural systems. Colour figure available online.

Fonte: Adaptado de Viana et al. (2022)

### III. CONTEXTO ATUAL DA MODELAÇÃO DAS ALTERAÇÕES DOS SOLOS COM USO AGRÍCOLA

As alterações dos solos de uso agrícola que observamos hoje são o resultado direto de uma combinação de fatores sociais, económicos e ambientais associados, por exemplo, às mudanças climáticas, inovações tecnológicas, prioridades ecológicas e políticas, etc., todos variando em diferentes escalas espaciais e temporais com implicações de longo prazo para o meio ambiente e o bem-estar da sociedade (Llerena-Montoya, *et al.*, 2021; Marcos-Martinez *et al.*, 2017; Müller *et al.*, 2020; van Vliet *et al.*, 2015). Assim, o estudo das alterações dos solos de uso agrícola pode ser apoiado por modelos que integrem estes múltiplos fatores e *feedbacks* complexos associados, considerando que o tempo é intrínseco ao conceito de alterações, e que estas alterações na sua componente temporal são graduais (Agarwal *et al.*, 2002). Como resultado, nas últimas décadas aumentou o número de estudos utilizando diferentes abordagens e técnicas científicas aplicadas a sistemas agrícolas (Viana *et al.*, 2022), permitindo auxiliar a gestão deste recurso, resultando num planeamento mais eficaz e em decisões políticas mais informadas (Cao *et al.*, 2019; Foley *et al.*, 2011; Weiss *et al.*, 2020).

Muitos modelos de alterações do uso do solo baseados na teoria geográfica e nas reconstruções de acontecimentos passados têm sido aplicados como ferramentas para extrapolar alterações nos solos de uso agrícola, particularmente, para analisar as alterações que ocorreram no passado usando perspectivas de longo prazo (cruzando diferentes anos, décadas ou séculos), e, assim, permitindo obter perspectivas históricas que podem ajudar a relevar soluções mais eficazes para os desafios atuais e futuros associados à produção de alimentos (Faísca *et al.*, 2021; Viana *et al.*, 2021). Os eventos históricos podem ser transformados em dados históricos que, por sua vez, podem ser utilizados para melhorar a exatidão de modelos de simulação ou estabelecer bases de referência para que diferentes disciplinas científicas possam realizar análises mais informadas (Boivin & Crowther, 2021; Winkler *et al.*, 2021). Modelar as alterações dos solos de uso agrícola com recurso a modelos de alterações do uso do solo permite obter uma avaliação espacial mais detalhada e plausível das transformações nestes sistemas contribuindo para uma maior compreensão da sua segurança a longo prazo e possíveis implicações globais (Foley *et al.*, 2011; Kelly *et al.*, 2013; Radwan *et al.*, 2019). Além disso, a capacidade de mapear e monitorizar as dinâmicas dos solos de uso agrícola permite fornecer informações espaciais e temporais mais precisas que contribuem para uma gestão eficaz destes solos e promovem o seu uso adequado, eficiente e racional (Akpoti *et al.*, 2019).

Num sentido lato, a emergência de abordagens de modelação do uso do solo tem sido impulsionada pelo aumento da capacidade de computação, pelo desenvolvimento exponencial dos SIG, em particular pelas disciplinas da geocomputação e da teoria de sistemas (tais como a complexidade, a auto-organização e as teorias não lineares), e por métodos avançados de recolha de dados (Albrecht, 2005; Goodchild, 2009; Zscheischler & Rogga, 2015). A necessidade de uma compreensão mais ampla da modelação do uso dos solos motivou uma revisão e categorização do número crescente de abordagens baseadas em SIG. Soesbergen (2016) e Noszczyk (2019) elaboraram revisões da literatura e concluíram que, atualmente, os modelos de simulação ou de interface com a inteligência artificial, em particular a *machine learning*, e a ligação a disciplinas como a computação e a matemática (e.g., através das redes neuronais artificiais, autómatos celulares, lógica difusa ou modelos baseados em agentes) são as abordagens mais populares. Contudo, este tipo de abordagens requer que haja constante produção e atualização de dados, particularmente com propriedades espaciais e temporais, que permitam a calibração e validação dos próprios modelos (Viana *et al.*, 2023; Weiss *et al.*, 2020). Sem dúvida, as capacidades em expansão destas abordagens baseadas em SIG e, mais especificamente, dos modelos de uso do solo, estão altamente dependentes do tipo de dados, da sua resolução e extensão espacial (van Vliet, 2013; van Vliet *et al.*, 2016). Como resultado, a disponibilidade e qualidade dos dados e, principalmente, dos dados geospaciais, é crucial.

#### 1. O valor dos dados geoespaciais na modelação das alterações do uso do solo

Os avanços nas técnicas de recolha de dados, a maior eficiência no processamento de dados e a disponibilização e aumento do número de bases de dados de domínio público contribuíram para o fornecimento de informações importantes e detalhadas para a monitorização ambiental, avaliação e uso sustentável dos recursos naturais e aplicações de desenvolvimento político, industrial e social (Hendler, 2013; Tiropanis *et al.*, 2014). Os avanços na tecnologia de deteção remota e a crescente disponibilidade de dados georreferenciados gratuitos, recolhidos e produzidos por agências governamentais, redes sociais e dispositivos móveis, contribuíram para o aumento substancial de

dados geoespaciais (Yu *et al.*, 2020). Em particular, dados de detecção remota são o tipo de dados mais comumente utilizados na modelação das alterações do uso do solo (Lu *et al.*, 2004; Weiss *et al.*, 2020; Wulder *et al.*, 2012). Por exemplo, as imagens do programa *Landsat*, com resolução espacial de 30m, são amplamente utilizadas para mapeamento multitemporal, quantificação e avaliação das alterações do uso do solo, devido ao seu extenso período operacional (quase 40 anos de registos) e ao acesso gratuito (Alam *et al.*, 2019; Viana *et al.*, 2019). Em Viana *et al.* (2019) os autores a partir de uma série temporal derivada de imagens *Landsat* classificaram uma área de estudo agro-silvo-pastoril localizada no distrito de Beja (Portugal) (fig. 2) e analisaram as principais mudanças ocorridas ao longo de 21 anos.

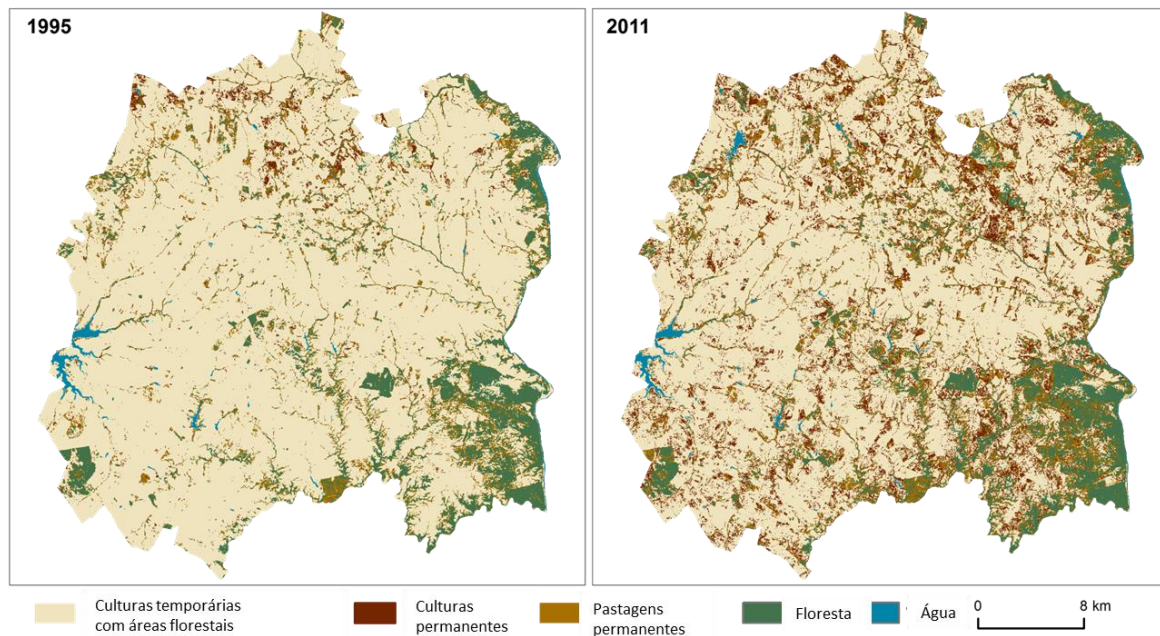


Fig. 2 - Classificações dos solos de uso agrícola a nível regional para 1995 e 2011. Figura a cores disponível online.

Fig. 2 – Agricultural land classifications at a regional level for 1995 and 2011. Colour figure available online.

Fonte: Adaptado de Viana, Girão *et al.* (2019)

Também imagens provenientes do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) disponibilizadas ao nível global e anualmente de 2000 a 2020, com resolução espacial de 250, 500 e 1000m, têm sido usadas para detectar alterações no uso do solo (Friedl *et al.*, 2010). Mais recentemente, regista-se um aumento na utilização de imagens dos programas *Sentinel-2* e *Sentinel-1* devido à sua alta resolução (10m), escala global e de acesso gratuito (Campos-Taberner *et al.*, 2020; Phiri *et al.*, 2020; Schulz *et al.*, 2021).

Dados de séries temporais regionais derivados do processamento de imagens de satélite e de dados *in situ*, como é exemplo o programa *CORINE Land Cover* (CLC), têm sido utilizados numa variedade de estudos para mapear e avaliar as alterações no uso do solo (Feranec *et al.*, 2017). O programa CLC é coordenado pela Agência Europeia do Ambiente e disponibiliza informação cartográfica temática do uso do solo para os 28 estados-membros da União Europeia e outros países europeus (Büttner & Feranec, 2002) para 1990, 2000, 2006, 2012 e 2018. A cartografia é produzida com regularidade por instituições governamentais ao nível nacional, sendo um recurso valioso que fornece informações para, por exemplo, planeamento e gestão do território, mapeamento de serviços de ecossistemas (Alves *et al.*, 2022; Meneses *et al.*, 2018; Viana & Rocha, 2020). Em Portugal, a DGT disponibiliza gratuitamente cartografia temática do uso e ocupação do solo para 1995, 2007, 2010, 2015 e 2018 (COS) (DGT, 2018). Por exemplo, em Viana e Rocha (2020) os autores utilizam cartografia COS disponibilizados pela DGT para quantificar, visualizar e extrapolar as transições espaço-temporais do uso do solo no distrito de Beja, em Portugal (fig. 3).

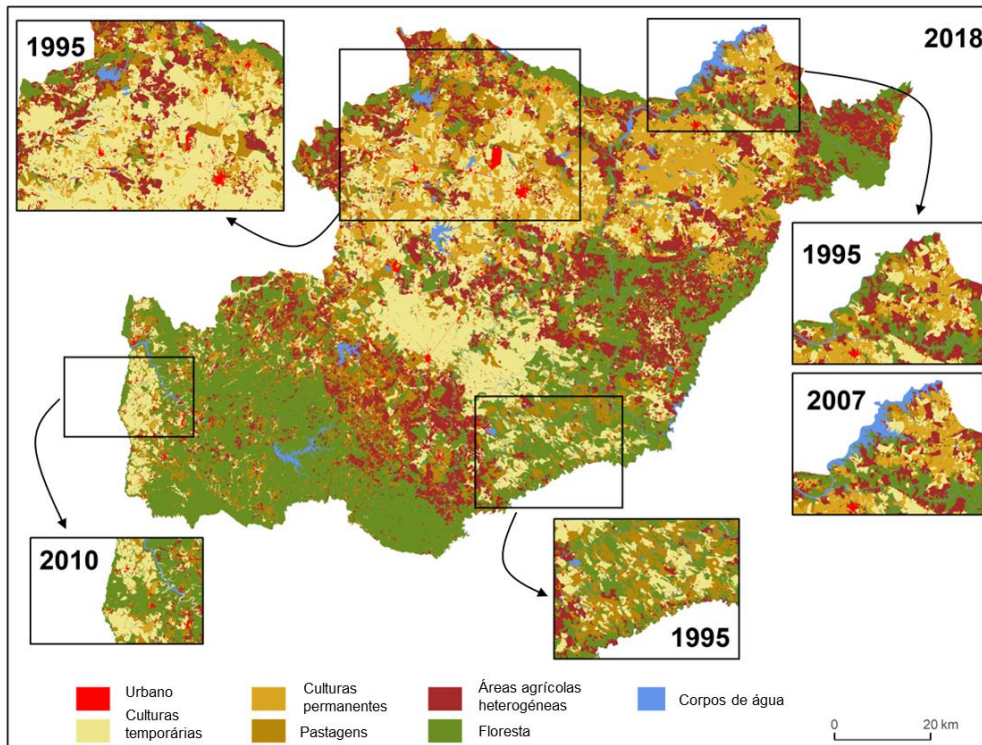


Fig. 3 – Dinâmicas dos solos de uso agrícola no distrito de Beja, entre 1995 e 2018. Figura a cores disponível online.

*Fig. 3 – Agricultural land use dynamics in Beja, district between 1995 and 2018. Colour figure available online.*

Fonte: Adaptado de Viana e Rocha (2020)

## 2. O potencial das fontes históricas na modelação das alterações do uso do solo

A aplicação de metodologias de análise espacial, no contexto dos SIG e no domínio científico da Geografia, tem facilitado a compreensão dos fenómenos relacionados com as dinâmicas naturais e antrópicas. Consequentemente, promover abordagens quantitativas e geoespaciais em áreas do conhecimento distantes do seu contexto científico habitual permite colocar em prática soluções e procedimentos e beneficiar processos e dinâmicas de inter e transdisciplinaridade (Gregory & Ell, 2005). Em particular, a maioria das fontes históricas contém alguma informação geográfica. Questões como: quando ocorreu determinado fenómeno? ou qual foi a extensão espacial do fenómeno? são exemplos que tanto os historiadores como os geógrafos responderiam para complementar e estruturar novos conhecimentos (Goodchild, 2002; Knowles, 2005). De facto, ambos os campos científicos estão divididos entre o espaço e o tempo e, embora os historiadores não possam ignorar o espaço, os geógrafos dificilmente ignoram o tempo. Por este motivo, nas últimas duas décadas, emergiu a disciplina dos “SIG Históricos” [*Historical GIS*] (HGIS) proveniente das Ciências Sociais e Humanas quando os dois elementos, tempo e espaço, foram reunidos para validar explicações históricas com evidências geográficas empíricas. HGIS é uma disciplina interdisciplinar centrada na utilização de abordagens geoespaciais a diferentes escalas e recorrendo aos SIG como ferramenta analítica para abordar questões históricas (Gregory & Geddes, 2014; Murrieta-Flores *et al.*, 2017).

Gregory (2001) identificou três principais vantagens no uso dos SIG em pesquisas históricas. Primeiramente, as fontes históricas integram informações com base nas suas localizações geográficas. Em segundo lugar, os SIG possibilitam a visualização dessas informações através de mapas ou até mesmo por meio de tecnologias avançadas, como animações de paisagens virtuais. Por fim, os SIG suportam diversas metodologias de análise espacial, reconhecendo a importância da localização geográfica das variáveis no processo de análise.

O desenvolvimento da disciplina HGIS tem-se dividido em investigação à escala local e projetos de escala nacional que estudam os mais diversos temas, em diferentes épocas históricas e regiões no mundo. O conhecimento adquirido com o desenvolvimento desta disciplina parte de uma primeira geração de projetos massivos e de notória vertente nacional, desenvolvidos principalmente a partir de grandes centros de investigação, que objetivavam a elaboração de cartografia temática de base ao nível nacional. Estes projetos procuravam criar materiais de base histórica e disponibilizá-los para fins

educacionais e de investigação, bem como ao público em geral (Knowles, 2008). Ao nível dos projetos nacionais espalhados pelo mundo, destaca-se o maior e mais antigo projeto desenvolvido na disciplina HGIS – o *The Great Britain Historical GIS* (GBHGIS) (Gregory & Southall, 2000). Iniciado em 1994, foi desenvolvido com a missão de criar um SIG com informações históricas da Grã-Bretanha, a partir de fontes documentais, incluindo estatísticas, mapas e documentos históricos, abrangendo a totalidade ou grande parte dos países. Ao mesmo tempo, em alguns departamentos destes centros de investigação, os primeiros avanços foram feitos principalmente por historiadores, que se focaram principalmente em temas de investigação à escala local (Rumsey & Williams, 2002).

Em Portugal, destaca-se o trabalho desenvolvido no Instituto de História Contemporânea, que iniciaram em 1993 a criação do primeiro “Sistema de Informação Geográfica aplicado à História de Portugal” (SIGMA), presente no site “Atlas, Cartografia Histórica” ([www.fctsh.unl.pt/atlas](http://www.fctsh.unl.pt/atlas)) (Alves & Puig, 2010). Outro exemplo é o do projecto português "Agricultura em Portugal: alimentação, desenvolvimento e sustentabilidade (1870-2010)" que procurou explorar abordagens complementares na análise da evolução dos sistemas agrários e rurais em Portugal. Neste projeto, a utilização dos SIG foi crucial para, a partir de fontes históricas (e.g., Anuários Estatísticos e Estatísticas Agrícolas guardados na Torre do Tombo e nos Arquivos Distritais), contruir bases de dados com séries quantitativas contínuas anuais entre 1850 e 2018 desagregadas ao nível regional sobre a produção de diferentes produtos agrícolas. Uma das mais importantes contribuições do projeto para o conhecimento científico foi a produção de uma longa série espaço-temporal com valores de produção anual para vários cereais (e.g., milho, trigo e arroz). A disponibilização desta série possibilitou o desenvolvimento de análises aplicando diferentes metodologias para obtenção de novas perspetivas geográficas e históricas da produção agrícola regional portuguesa (Faisca *et al.*, 2021; Viana *et al.*, 2021; Faisca *et al.*, 2023). Por exemplo, recorrendo a esta série Viana *et al.* (2021) analisaram a evolução da produção agrícola em Portugal (fig. 4) e avaliaram os seus padrões e tendências espaço-temporais (fig. 5), permitindo uma leitura cruzada abrangente das características gerais da distribuição regional da produção durante um período de 169 anos.



Fig. 4 – Padrões espaciotemporais da produção de trigo por distrito em Portugal Continental (1850-2018). Figura a cores disponível online.

*Fig. 4 – Spatiotemporal pattern of wheat production by district in continental Portugal (1850-2018). Colour figure available online.*

Fonte: Adaptado de Viana *et al.* (2021)



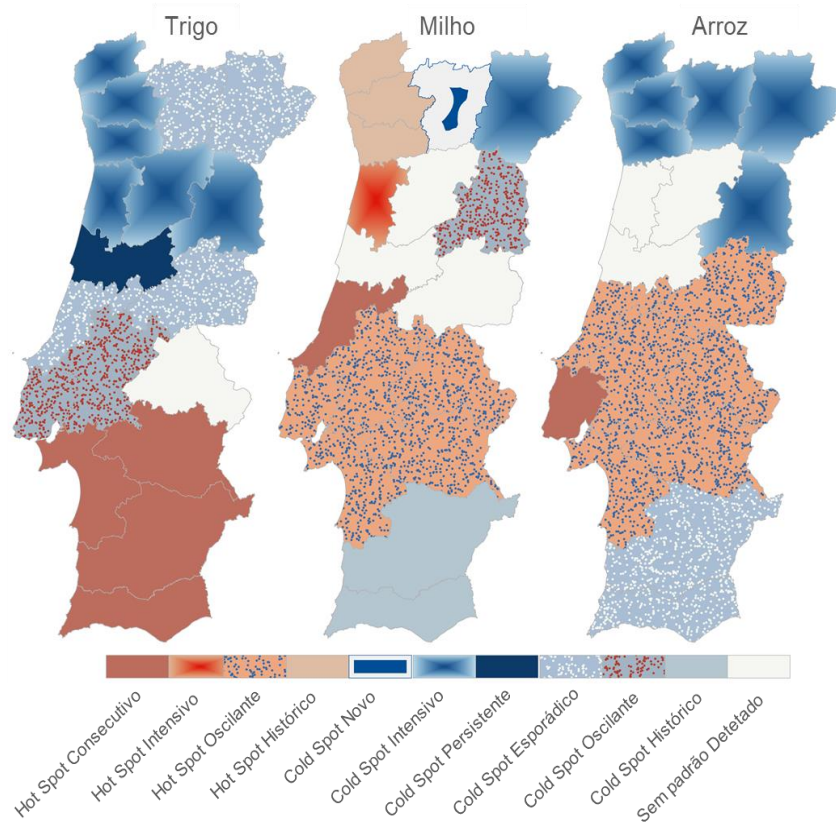


Fig. 5 – Padrões da tendência de produção de trigo, milho e arroz em Portugal Continental (1850-2018). Figura a cores disponível online,

*Fig. 5 – Production trend pattern of wheat, maize, and rice in continental Portugal (1850-2018). Colour figure available online.*

Fonte: Adaptado de Viana *et al.* (2021)

Numa nota mais geral, analisar o passado usando perspetivas de longo prazo (cruzando diferentes anos, décadas ou séculos) permite obter perspetivas históricas que podem fornecer informações espacio-temporais mais precisas e contribuir para uma gestão mais eficaz do uso do solo. Como os fenómenos ocorrem em múltiplas escalas espaciais e temporais, a capacidade de avaliar ocorrências passadas pode fornecer soluções mais eficazes para os fenómenos atuais e futuros que a sociedade enfrenta (Boivin & Crowther, 2021). Na verdade, a tecnologia SIG tem desempenhado um papel significativo na reconstrução de fontes históricas permitindo extrair, analisar e comparar informações passadas com as mais recentes e inspirando novos cenários de compreensão ao procurar no espaço a evolução temporal de eventos histórico-geográficos, através, sobretudo, da construção de argumentos visuais e tipologias textuais, recorrendo a mapas e diagramas representativos dos processos espaciais. Como as fontes históricas estão disponíveis em diversos formatos (e.g., analógico e tabular), é possível transformar os mesmos em dados geoespaciais. Por exemplo, dados históricos provenientes de registos estatísticos regionais (e.g., censos) e representações visuais do território como documentos analógicos antigos (e.g., mapas Perry 1882-84, Carta Agrícola e Florestal, 1965, cadastros) (fig. 6) apresentam também um grande potencial para serem utilizados na modelação das alterações do uso do solo (Viana, Encalada, *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2017; Sequeira *et al.*, 2022; Nunes *et al.*, 2023). Por exemplo, Brown *et al.* (2005) utilizaram registos históricos, para extrair informações sobre tipos de culturas agrícolas, rendimentos e práticas de gestão dos solos e georreferenciaram os locais mencionados nos registos criando conjuntos de dados espaciais que fornecem novas perspetivas sobre a distribuição e a intensidade das atividades agrícolas no passado.

Contudo, a utilização de fontes históricas para detetar, por exemplo, padrões e tendências espácio-temporais, bem como para modelar eventos futuros, apresentam alguns desafios relacionados com a sua transcrição e transformação em dados normalizados, detalhados e estruturados. Por exemplo, mapas históricos podem carecer de detalhes ou precisão espacial, especialmente para regiões remotas ou menos documentadas.

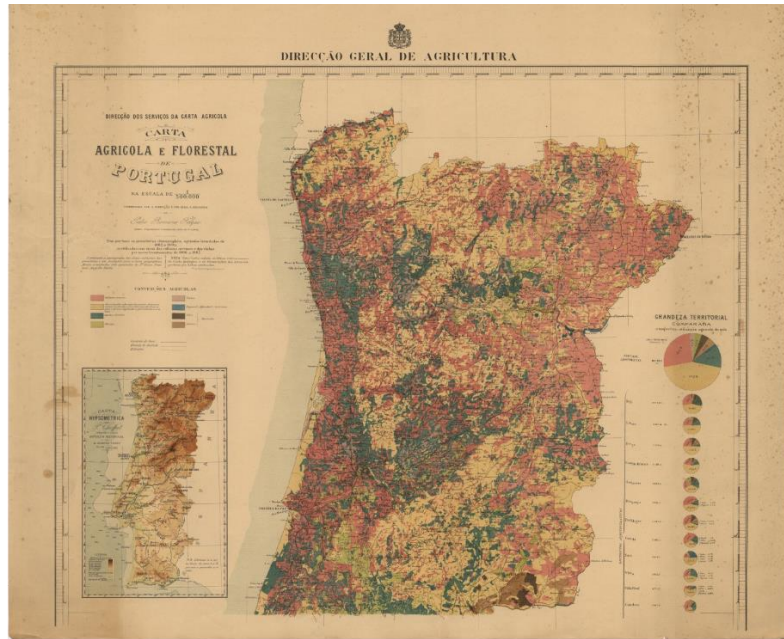


Fig. 6 – Carta agrícola e florestal de Portugal (1910). Figura a cores disponível online.

Fig. 6 – *Chart of agricultural and forestry areas in Portugal (1910). Colour figure available online.*

Fonte: Direcção dos Serviços da Carta Agrícola, 1910 ([S.l.]: Oficinas da Direcção Geral dos Trabalhos Geodésicos e Topographicos)

Torna-se, portanto, necessário encontrar abordagens que permitam normalizar as diferentes fontes de informação e reconstruir quantitativamente os dados dos diferentes períodos.

Neste seguimento, destaca-se o projeto AgroecoDecipher – Análise geográfica das tendências agroecológicas através de fontes históricas e inteligência artificial. Especificamente, este projeto com carácter exploratório procura encontrar soluções que permitam reunir e melhorar a qualidade e precisão de fontes agroecológicas históricas na forma e estrutura de dados atualmente em uso pelos modelos de simulação. O projeto utiliza como base estatística e espacial a informação disponível nos Inquéritos Agrícolas e Florestais do Plano de Fomento Agrário (fig. 7), publicados em diferentes anos da década de 1950.

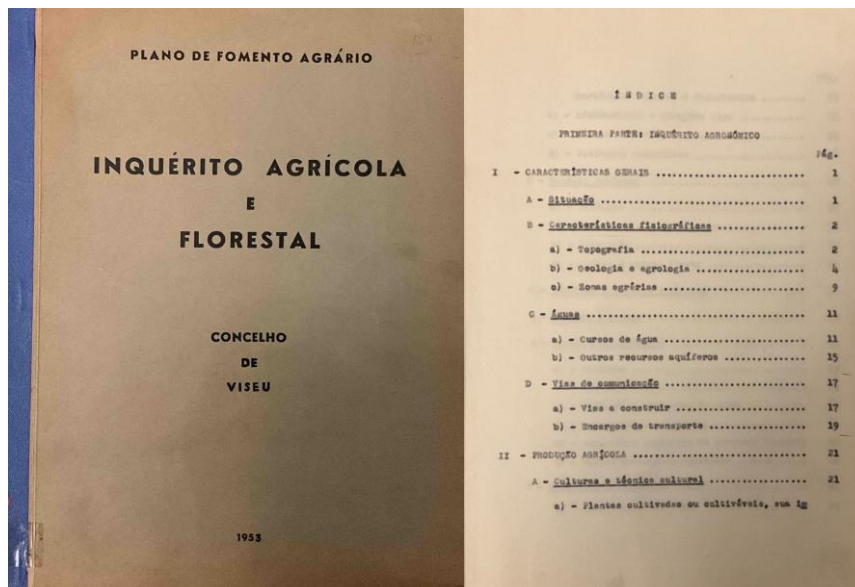


Fig. 7 –Inquérito agrícola e florestal – Plano de Fomento Agrário do concelho de Viseu (1953). Figura a cores disponível online.

Fig. 7 – *Agricultural and forestry Survey – Agrarian Development Plan for the municipality of Viseu (1953). Colour figure available online.*

Fonte: Inquérito agrícola e florestal do concelho de Viseu – 1953-1956, Biblioteca da DGADR

Estes inquéritos possuem informação histórica (em formato textual, tabular e cartográfico) relacionada com as características edafoclimáticas, agroecológicas e fisiográficas (e.g., clima, solo, água, uso do solo, redes rodoviárias) de cada município de Portugal continental, reunindo informação sobre quase todos os aspectos da economia rural de Portugal e incluindo uma descrição detalhada dos usos agrícolas e florestais e a sua adequação. Extrair estas informações detalhadas pode contribuir para reconstruir as condições e tendências agroecológicas históricas e entender os possíveis comportamentos complexos e as dinâmicas entre diferentes variáveis que descrevem os sistemas agrícolas em Portugal. Ao reconstruir as tendências agroecológicas possibilita-se a análise da correlação entre os impactos das atividades humanas com as mudanças climáticas e ambientais, fundamental para melhor entender problemas relacionados com a segurança alimentar, estabilidade social, biodiversidade, clima e uso sustentável do solo.

#### IV. NOTAS FINAIS

A relevância da agricultura e da alimentação nos debates atuais tem ganhado um novo destaque, levantando diversas questões que estimulam a investigação científica. Num ambiente científico globalizado, o desafio diário para um investigador é acompanhar e manter-se atualizado da produção académica dos pares. A heterogeneidade dos estudos relacionados com os sistemas agrícolas exige uma sistematização interdisciplinar e abrangente das diferentes direções da investigação, abordagens metodológicas, escalas de análise e dados de referência utilizados.

Este artigo apresenta uma reflexão dos avanços no desenvolvimento e integração de análises espaciais, dados geoespaciais e modelos no campo dos sistemas agrícolas, possibilitando avaliar os impactos que as técnicas de modelação e tecnologias geoespaciais podem ter na investigação que estão a realizar. A análise presente visou proceder a uma revisão das contribuições de diferentes estudos sobre sistemas agrícolas, apresentando uma síntese da diversidade disciplinar do conhecimento científico disponível e indicando o caminho para atuais e futuras investigações.

Num sentido mais lato, o avanço da tecnologia SIG, o desenvolvimento de ferramentas e técnicas mais eficientes e a recolha e disponibilidade de dados facilitam o desenvolvimento de novos conhecimentos mais formalizados sobre os sistemas agrícolas em múltiplas escalas espaciais e temporais e contextos geográficos. No entanto, em termos de implicações práticas, a aplicação de análises espaciais, dados geoespaciais e modelos de simulação na investigação dos sistemas agrícolas varia de acordo com os objetivos e o uso pretendido, estrutura dos modelos, disponibilidade de dados e ainda a existência de dados geoespaciais adequados e precisos. Resumidamente, destaca-se a importância das seguintes estratégias metodológicas: i) padronização e normalização de dados; ii) integração de múltiplas fontes de dados; iii) validação e avaliação dos dados e iv) aplicação de tecnologias avançadas.

Conclui-se que, com a integração de conceitos, métodos e ferramentas SIG, existe uma oportunidade prática para modelar os sistemas agrícolas em resposta a cenários de por exemplo alterações climáticas ou de reforma política, principalmente quando desenvolvidos de uma forma espacialmente explícita, integrada e em multi-escala. Por sua vez, esta realidade poderá ajudar a fornecer informações significativas para a formulação, planeamento, gestão e investimento de políticas de longo prazo, que são essenciais para enfrentar os desafios globais de produção e segurança alimentar, antecipar mudanças futuras e projetar estratégias robustas a longo prazo para gerir os desafios iminentes do presente século.

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) no âmbito do projeto n.º 2022.09372.PTDC e pelo Centro de Estudos Geográficos – Universidade de Lisboa e FCT (n.º UIDB/00295/2020 + UIDP/ 00295/2020).

#### ORCID ID

Cláudia M. Viana  <https://orcid.org/0000-0001-6858-4522>

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agarwal, C., Green, G. M., Grove, J. M., Evans, T. P., & Schweik, C. M. (2002). *A Review and assessment of land-use change models: dynamics of space, time, and human choice*. United States Department of Agriculture. <https://doi.org/10.2737/NE-GTR-297>
- Akpoti, K., Kabo-bah, A. T., & Zwart, S. J. (2019). Agricultural land suitability analysis: state-of-the-art and outlooks for integration of climate change analysis. *Agricultural Systems*, 173, 172-208. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.02.013>
- Alam, A., Bhat, M. S., & Maheen, M. (2019). Using Landsat satellite data for assessing the land use and land cover change in Kashmir valley. *GeoJournal – Spatially Integrated Social Sciences and Humanities*, 85(6), 1529-1543. <https://doi.org/10.1007/S10708-019-10037-X>
- Albrecht, J. (2005). A New Age for Geosimulation. *Transactions in GIS*, 9(4), 451-454. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2005.00228.x>
- Alves, A., Marcelino, F., Gomes, E., Rocha, J., & Caetano, M. (2022). Spatiotemporal Land-Use Dynamics in Continental Portugal 1995–2018. *Sustainability*, 14(23), 15540. <https://doi.org/10.3390/su142315540>
- Alves, D., & Puig, J. (2010). IP-HGIS – Um Sistema de Informação Geográfica aplicado à História da Península Ibérica [IP-HGIS – A Geographic Information System applied to the History of the Iberian Peninsula]. *MyESIG2010*. Portugal. <http://hdl.handle.net/10362/4932>
- Antle, J. M., Basso, B., Conant, R. T., Godfray, H. C. J., Jones, J. W., Herrero, M. ... Wheeler, T. R. (2017). Towards a new generation of agricultural system data, models and knowledge products: Design and improvement. *Agricultural Systems*, 155, 255-268. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.10.002>
- Avtar, R., Aggarwal, R., Kharrazi, A., Kumar, P., & Kurniawan, T. A. (2020). Utilizing geospatial information to implement SDGs and monitor their Progress. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(1), 1-21. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7996-9>
- Boivin, N., & Crowther, A. (2021). Mobilizing the past to shape a better Anthropocene. *Nature Ecology & Evolution*, 5, 273-284. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-01361-4>
- Brown, D. G., Johnson, K. M., Loveland, T. R. & Theobald, D. M. (2005), Rural land-use trends in the conterminous united states, 1950-2000. *Ecological Applications*, 15(6), 1851-1863. <https://doi.org/10.1890/03-5220>
- Büttner, G., & Feranec, J. (2002). *The CORINE Land Cover update 2000. Technical guidelines*. EEA Technical Report, 89.
- Campos-Taberner, M., García-Haro, F. J., Martínez, B., Izquierdo-Verdiguier, E., Atzberger, C., Camps-Valls, G., & Gilabert, M. A. (2020). Understanding deep learning in land use classification based on Sentinel-2 time series. *Scientific Reports*, 10(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74215-5>
- Cao, M., Zhu, Y., Lü, G., Chen, M., & Qiao, W. (2019). Spatial Distribution of Global Cultivated Land and Its Variation between 2000 and 2010, from Both Agro-Ecological and Geopolitical Perspectives. *Sustainability*, 11(5), 1242. <https://doi.org/10.3390/su11051242>
- Castillo, C. P., Jacobs-Crisioni, C., Diogo, V., & Lavalle, C. (2021). Modelling agricultural land abandonment in a fine spatial resolution multi-level land-use model: an application for the EU. *Environmental Modelling and Software*, 136, 104946. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104946>
- Curry, R. B., Peart, R. M., Jones, J. W., Boote, K. J., & Allen, L. H. (1990). Response of crop yield to predicted changes in climate and atmospheric CO<sub>2</sub> using simulation. *Transactions of the ASAE*, 33(4), 1383-1390. <https://doi.org/10.13031/2013.31484>
- Delgado, C., Rosegrant, M., Steinfeld, H., Ehui, S., & Courbois, C. (2016). Livestock to 2020: the next food revolution. *Outlook on Agriculture*, 30(1), 27-29. <https://doi.org/10.5367/000000001101293427>
- Dent, J. B., & Blackie, M. J. (1979). *Systems Simulation in Agriculture*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-6373-6>
- Direção Geral do Território. (2018). *Especificações Técnicas da Carta de Uso e Ocupação do Solo (COS) de Portugal Continental para 1995, 2007, 2010 e 2015* [Technical Specifications of the Land Use and Occupation Charter (COS) of Continental Portugal for 1995, 2007, 2010 and 2015]. DGT. <http://mapas.dgterritorio.pt/atom-dgt/pdf-cous/COS2015/ET-COS-1995-2007-2010-2015.pdf>
- Dillon, J. L., & McConnell, D. J. (1997). *Farm management for Asia: a systems approach*. FAO Farm Systems Management Series – 13. FAO. <https://www.fao.org/3/w7365e/w7365e00.htm>
- Duncan, W. G., Loomis, R. S., Williams, W. A., & Hanau, R. (1967). A model for simulating photosynthesis in plant communities. *Hilgardia*, 38(4), 181-205. <https://doi.org/10.3733/HILG.V38N04P181>
- Faísca, C. M., Freire, D., & Viana, C. M. (2023). Changing rice geographies: a long-term perspective of Portuguese regional production (1860-2018). *História Agrária*, 91, 99-128. <https://doi.org/10.26882/histagrar.091e07f>

- Faisca, C. M., Freire, D., & Viana, C. M. (2021). The State and Natural Resources: 250 Years of Rice Production in Portugal, 18th-21st Centuries. *Ler História*, 79, 241-262. <https://doi.org/10.4000/LERHISTORIA.9542>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2017). *The Future of Food and Agriculture – Trends and Challenges*. FAO. [www.fao.org/publications](http://www.fao.org/publications)
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1976). *A framework for land evaluation*. Soils bulletin 32. FAO.
- Feranec, J., Soukup, T., Taff, G., Stych, P., & Bicik, I. (2017). Overview of changes in land cover and land use in Eastern Europe. In G. Gutman & V. Radeloff (Eds.), *Land-cover and land-use changes in Eastern Europe after the collapse of the Soviet Union in 1991* (pp. 13-33). Springer.
- Ferreira, D. de B. (2001). Evolução da paisagem de montado no Alentejo Interior ao longo do século XX: Dinâmica e incidências ambientais [Evolution of the cork oak landscape in the Alentejo Interior throughout the 20th century: Dynamics and environmental impacts]. *Finisterra – Revista Portuguesa de Geografia*, XXXVI(72), 179-193. <https://doi.org/10.18055/Finis1633>
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M. ... Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337-342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- Freer, M., Moore, A. D., & Donnelly, J. R. (1997). GRAZPLAN: Decision support systems for Australian grazing enterprises – I. Overview of the GRAZPLAN project, and a description of the MetAccess and LambAlive DSS. *Agricultural Systems*, 54(1), 57-76.
- Freire, D., & Lains, P. (2017). *An agrarian history of Portugal, 1000-2000: economic development on the European frontier*. Brill.
- Freire, D., & Lains, P. (2015). *An Agrarian History of Portugal (year 1000 to 2000)*. Brill.
- Friedl, M. A., Sulla-Menashe, D., Tan, B., Schneider, A., Ramankutty, N., Sibley, A., & Huang, X. (2010). MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*, 114(1), 168-182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.016>
- Fuchs, R., Herold, M., Verburg, P. H., Clevers, J. G. P. W., & Eberle, J. (2015). Gross changes in reconstructions of historic land cover/use for Europe between 1900 and 2010. *Global Change Biology*, 21(1), 299-313. <https://doi.org/10.1111/gcb.12714>
- Goodchild, M. F. (2009). Geographic information systems and science: today and tomorrow. *Procedia Earth and Planetary Science*, 1(1), 1037-1043. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2009.09.160>
- Goodchild, M. F. (2002). Combining Space and Time: New Potential for Temporal GIS. In A. K. Knowles (Ed.), *Past time, past place: GIS for history* (pp. 179-197). ESRI Press Books.
- Gregory, I., Kemp, K., & Mostern, R. (2001). Geographical Information and historical research: current progress and future directions. *History and Computing*, 13(1), 7-23. <https://doi.org/10.3366/hac.2001.13.1.7>
- Gregory, I., & Ell, P. (2005). Breaking the boundaries: geographical approaches to integrating 200 years of the census. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society)*, 168(2), 419-437. <https://doi.org/10.1111/j.1467-985X.2005.00356.x>
- Gregory, I., & Geddes, A. (2014). *Towards Spatial Humanities: Historical GIS and Spatial History*. Indiana University Press.
- Gregory, I., & Southall, H. (2000). Spatial frameworks for historical censuses: the Great Britain Historical GIS. In P. Hall, R. McCaa & G. Thorvaldsen (Eds.), *Handbook of historical microdata for population research* (pp. 319-333). Minnesota Population Center.
- Heady, E. O. (1957). An Econometric Investigation of the Technology of Agricultural Production Functions. *Econometrica*, 25(2), 249. <https://doi.org/10.2307/1910253>
- Hendler, J. (2013). Broad Data: Exploring the Emerging Web of Data. *Big Data*, 1(1), 18-20. <https://doi.org/10.1089/BIG.2013.1506>
- Jones, J. W., Antle, J. M., Basso, B., Boote, K. J., Conant, R. T., Foster, I. ... Wheeler, T. R. (2017). Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: state of agricultural systems science. *Agricultural Systems*, 155, 269-288. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.09.021>
- Jones, J. W., Antle, J. M., Basso, B., Boote, K. J., Conant, R. T., Foster, I. ... Wheeler, T. R. (2016). Brief history of agricultural systems modeling. *Agricultural Systems*, 155, 240-254. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.05.014>
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A. ... Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4), 235-265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)
- Kastner, T., Rivas, M. J. I., Koch, W., & Nonhebel, S. (2012). Global changes in diets and the consequences for land requirements for food. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(18), 6868-6872. <https://doi.org/10.1073/pnas.1117054109>

- Kelly, R. A., Jakeman, A. J., Barreteau, O., Borsuk, M. E., ElSawah, S., Hamilton, S. H. ... Voinov, A. A. (2013). Selecting among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management. *Environmental Modelling & Software*, 47, 159-181. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.05.005>
- Knowles, A. K. (2008). Gis and History. In A. K. Knowles & A. Hillier (Eds.), *Placing History. How Maps, Spatial Data, and GIS are changing Historical Scholarship* (pp. 1-24). ESRI.
- Knowles, A. K. (2005). Emerging trends in historical GIS. *Historical Geography*, 33, 7-13. <https://d2cu82y6eo7f22.cloudfront.net/2020/01/16184618/01HG33-Knowles.pdf>
- Lambin, E. F., Rounsevell, M. D. A., & Geist, H. J. (2000). Are agricultural land-use models able to predict changes in land-use intensity? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 82(1-3), 321-331. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00235-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00235-8)
- Llerena-Montoya, S., Velastegui-Montoya, A., Zhirzhan-Azanza, B., Herrera-Matamoros, V., Adami, M. ... Encalada, L. (2021). Multitemporal Analysis of Land Use and Land Cover within an Oil Block in the Ecuadorian Amazon. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(3), 191. <https://doi.org/10.3390/ijgi10030191>
- Lu, D., Mausel, P., Brondízio, E., & Moran, E. (2004). Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12), 2365-2401. <https://doi.org/10.1080/0143116031000139863>
- MacDonald, D., Crabtree, J. R., Wiesinger, G., Dax, T., Stamou, N., Fleury, P. ... Gibon, A. (2000). Agricultural abandonment in mountain areas of Europe: environmental consequences and policy response. *Journal of Environmental Management*, 59(1), 47-69. <https://doi.org/10.1006/JEMA.1999.0335>
- Marcos-Martinez, R., Bryan, B. A., Connor, J. D., & King, D. (2017). Agricultural land-use dynamics: assessing the relative importance of socioeconomic and biophysical drivers for more targeted policy. *Land Use Policy*, 63, 53-66. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.01.011>
- Medeiros, C. A. (2009). *Geografia de Portugal: ambiente natural e ocupação humana: uma introdução* [Geography of Portugal: natural environment and human occupation: an introduction]. Editorial Estampa.
- Meneses, B. M., Reis, E., Vale, M. J., & Reis, R. (2018). Modelling the Land Use and Land cover changes in Portugal: a multi-scale and multi-temporal approach. *Finisterra – Revista Portuguesa de Geografia*, LIII(107). <https://doi.org/10.18055/Finis12258>
- Müller, B., Hoffmann, F., Heckeley, T., Müller, C., Hertel, T. W., Polhill, J. G. ... Webber, H. (2020). Modelling food security: bridging the gap between the micro and the macro scale. *Global Environmental Change*, 63, 102085. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102085>
- Murrieta-Flores, P., Donaldson, C., & Gregory, I. (2017). GIS and Literary History: advancing digital humanities research through the spatial analysis of historical travel. *DHQ: Digital Humanities Quarterly*, 11(1), 1-18. <http://www.digitalhumanities.org/dhq/vol/11/1/000283/000283.html>
- Nelson, G. C., Rosegrant, M. W., Palazzo, A., Gray, I., Ingersoll, C., Robertson, R. D. ... You, L. (2010). *Food Security, Farming, and Climate Change to 2050: Scenarios, Results, Policy Options*. International Food Policy Research Institute. <https://doi.org/10.2499/9780896291867>
- Noszczyk, T. (2019). A review of approaches to land use changes modeling. *Human and Ecological Risk Assessment*, 25(6), 1377-1405. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1468994>
- Nunes, A., Ornelas, A., Vieira, P., Dias, Â., & Martins, B. (2023). Impacts of Land Use Change on Landscape Structure and Ecosystem Services at Local Scale: A Case Study in Central Portugal. *Quaestiones Geographicae*, 42(1) 43-57. <https://doi.org/10.14746/quageo-2023-0004>
- Olesen, J. E., Trnka, M., Kersebaum, K. C., Skjelvåg, A. O., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P. ... Micale, F. (2011). Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy*, 34(2), 96-112. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.11.003>
- Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V. R., Murayama, Y., & Ranagalage, M. (2020). Sentinel-2 Data for Land Cover/Use Mapping: a review. *Remote Sensing*, 12(14), 2291. <https://doi.org/10.3390/RS12142291>
- Radwan, T. M., Blackburn, G. A., Whyatt, J. D., & Atkinson, P. M. (2019). Dramatic Loss of Agricultural Land Due to Urban Expansion Threatens Food Security in the Nile Delta, Egypt. *Remote Sensing*, 11(3), 332. <https://doi.org/10.3390/rs11030332>
- Rocha, J., Oliveira, S., Viana, C. M., & Ribeiro, A. I. (2022). Climate change and its impacts on health, environment and economy. In J. C. Prata, A. I. Ribeiro & T. Rocha-Santos (Eds.), *One Health: Integrated Approach to 21st Century Challenges to Health* (pp. 253-279). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822794-7.00009-5>
- Rosenzweig, C., & Parry, M. L. (1994). Potential impact of climate change on world food supply. *Nature*, 367(6459), 133-138. <https://doi.org/10.1038/367133a0>
- Rumsey, D., & Williams, M. (2002). Historical maps in GIS. In A. Knowles (Ed.), *Past time, past place: GIS for history* (pp. 1-18). ESRI Press.

- Schulz, D., Yin, H., Tischbein, B., Verleysdonk, S., Adamou, R., & Kumar, N. (2021). Land use mapping using Sentinel-1 and Sentinel-2 time series in a heterogeneous landscape in Niger, Sahel. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 178, 97-111. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.06.005>
- Scown, M. W., Winkler, K. J., & Nicholas, K. A. (2019). Aligning research with policy and practice for sustainable agricultural land systems in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(11), 4911-4916. <https://doi.org/10.1073/pnas.1812100116>
- Sequeira, A., Nunes, L., Caetano, M., Marcelino, F., Rocha, M., & Rego, F. (2022). Dinâmicas de uso e ocupação do solo entre 1951-80 e 2018 em Portugal Continental [Land use and occupation dynamics between 1951-80 and 2018 in mainland Portugal]. *Silva Lusitana*, 30(2), 87-105. <https://doi.org/10.1051/silu/20223002087>
- Soesbergen, A. van. (2016). *A review of land-use change models*. United Nations Environment Programme.
- Stephens, E. C., Jones, A. D., & Parsons, D. (2018). Agricultural systems research and global food security in the 21st century: an overview and roadmap for future opportunities. *Agricultural Systems*, 163, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.011>
- Tanure, S., Nabinger, C., & Becker, J. L. (2015). Bioeconomic Model of Decision Support System for Farm Management: proposal of a mathematical model. *Systems Research and Behavioral Science*, 32(6), 658-671. <https://doi.org/10.1002/SRES.2252>
- Tiropanis, T., Hall, W., Hendler, J., & de Larrinaga, C. (2014). The Web Observatory: a middle layer for broad data. *Big Data*, 2(3), 129-130. <https://doi.org/10.1089/BIG.2014.0035>
- van Vliet, J. (2013). *Calibration and validation of land-use models*. Wageningen University.
- van Vliet, J., Bregt, A. K., Brown, D. G., van Delden, H., Heckbert, S., & Verburg, P. H. (2016). A review of current calibration and validation practices in land-change modeling. *Environmental Modelling and Software*, 82, 174-182. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.04.017>
- van Vliet, J., de Groot, H. L. F., Rietveld, P., & Verburg, P. H. (2015). Manifestations and underlying drivers of agricultural land use change in Europe. *Landscape and Urban Planning*, 133, 24-36. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.09.001>
- Verburg, P. H., Crossman, N., Ellis, E. C., Heinimann, A., Hostert, P., Mertz, O. ... Zhen, L. (2015). Land system science and sustainable development of the earth system: a global land project perspective. *Anthropocene*, 12, 29-41. <https://doi.org/10.1016/j.LANCENE.2015.09.004>
- Viana, C. M., Encalada, L., & Rocha, J. (2019). The value of OpenStreetMap Historical Contributions as a Source of Sampling Data for Multi-temporal Land Use/Cover Maps. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(3), 116. <https://doi.org/10.3390/ijgi8030116>
- Viana, C. M., Freire, D., Abrantes, P., & Rocha, J. (2021). Evolution of Agricultural Production in Portugal during 1850-2018: a geographical and historical perspective. *Land*, 10(8), 776. <https://doi.org/10.3390/LAND10080776>
- Viana, C. M., Freire, D., Abrantes, P., Rocha, J., & Pereira, P. (2022). Agricultural land systems importance for supporting food security and sustainable development goals: a systematic review. *Science of The Total Environment*, 806, 150718. <https://doi.org/10.1016/j.SCITOTENV.2021.150718>
- Viana, C. M., Gilmore Pontius Jr, R., & Rocha, J. (2023). Four Fundamental Questions to Evaluate Land Change Models with an Illustration of a Cellular Automata-Markov Model. *Annals of the American Association of Geographers*, 113(10), 2497-2511. <https://doi.org/10.1080/24694452.2023.2232435>
- Viana, C. M., Girão, I., & Rocha, J. (2019). Long-Term Satellite Image Time-Series for Land Use/Land Cover Change Detection Using Refined Open Source Data in a Rural Region. *Remote Sensing*, 11(9), 1104. <https://doi.org/10.3390/rs11091104>
- Viana, C. M., & Rocha, J. (2020). Evaluating Dominant Land Use/Land Cover Changes and Predicting Future Scenario in a Rural Region Using a Memoryless Stochastic Method. *Sustainability*, 12(10), 4332. <https://doi.org/10.3390/su12104332>
- Weiss, M., Jacob, F., & Duveiller, G. (2020). Remote sensing for agricultural applications: a meta-review. *Remote Sensing of Environment*, 236, 111402. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402>
- Wilkerson, G. G., Jones, J. W., Boote, K. J., Ingram, K. T., & Mishoe, J. W. (1983). Modeling soybean growth for crop management. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 26(1), 63-73.
- Winkler, K., Fuchs, R., Rounsevell, M., & Herold, M. (2021). Global land use changes are four times greater than previously estimated. *Nature Communications*, 12(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22702-2>
- Worthington, E. B. (1975). *The Evolution of IBP*. Cambridge University Press.

- Wu, W. B., Yu, Q. Y., Verburg, P. H., You, L. Z., Yang, P., & Tang, H. J. (2014). How could agricultural land systems contribute to raise food production under global change? *Journal of Integrative Agriculture*, 13(7), 1432-1442. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(14\)60819-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60819-4)
- Wulder, M. A., Masek, J. G., Cohen, W. B., Loveland, T. R., & Woodcock, C. E. (2012). Opening the archive: how free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. *Remote Sensing of Environment*, 122, 2-10. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.010>
- Yang, Y., Zhang, S., Liu, Y., Xing, X., & De Sherbinin, A. (2017). Analyzing historical land use changes using a Historical Land Use Reconstruction Model: A case study in Zhenlai County, northeastern China. *Scientific Reports*, 7, 41275. <https://doi.org/10.1038/srep41275>
- Yu, M., Bambacus, M., Cervone, G., Clarke, K., Duffy, D., Huang, Q. ... Yang, C. (2020). Spatiotemporal event detection: a review. *International Journal of Digital Earth*, 13(12), 1339-1365. <https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1738569>
- Zscheischler, J., & Rogga, S. (2015). Transdisciplinarity in land use science: a review of concepts, empirical findings and current practices. *Futures*, 65, 28-44. <https://doi.org/10.1016/J.FUTURES.2014.11.005>