



# Thèse / Thesis

requis per  
l'obtenció del Títol

submitted  
for the Degree of

## Master of Science

**EVALUACIÓN Y MODELIZACIÓN CON SIG DEL  
EFECTO DEL MANEJO DEL SUELO Y PLANTA  
SOBRE LA GENERACIÓN DE ESCORRENTÍA,  
PÉRDIDA DE SUELO Y CONECTIVIDAD  
HIDROLÓGICA EN LA CUENCA DEL RÍO VERO  
(HUESCA, NE ESPAÑA)**

**Nahed BEN SALEM**

Zaragoza, julio 2018

**Institut Agronòmic Mediterrani de  
*Mediterranean Agronomic Institut of*  
Zaragoza**

**Université de Lleida  
*University of Lleida***



Z-AuDei



CSIC

Bib TC-2018-1

99179/2898304201

CB 1391544

TC-2018-1

CENTRO INTERNACIONAL DE ALTOS ESTUDIOS AGRONÓMICOS MEDITERRÁNEOS  
INSTITUTO AGRONÓMICO MEDITERRÁNEO DE ZARAGOZA

EVALUACIÓN Y MODELIZACIÓN CON SIG DEL EFECTO DEL MANEJO DEL SUELO Y  
PLANTA SOBRE LA GENERACIÓN DE ESCORRENTÍA, PÉRDIDA DE SUELO Y  
CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA CUENCA DEL RÍO VERO (HUESCA, NE ESPAÑA)

Nahed BEN SALEM

Trabajo realizado en el Grupo de Manejo del Suelo y Cambio Global, Departamento de Suelo y Agua de la Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Zaragoza, bajo la dirección del **Dr. Manuel LOPEZ VICENTE**,

y presentado en lectura pública el día 18 de julio de 2018, ante el siguiente tribunal:

- **María Concepción RAMOS MARTÍN**, Presidente, Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria, Universitat de Lleida (UdL),
- **Estela NADAL ROMERO**, Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Zaragoza (UZ),
- **Juan BELLOT ABAD**, Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias, Universidad de Alicante (UA).

R. 15.684



*Al alma de mi padre Ridha y a mi madre Samia*

## I. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de Tesis es el fruto de un esfuerzo en el que han participado muchas personas, de una manera directa o indirecta, dirigiendo, corrigiendo, dando ánimo, acompañando en los momentos tanto de crisis como de felicidad. Este trabajo me ha dado la ocasión de aprovechar la competencia, experiencia y apoyo de muchas personas que deseo agradecer en estas líneas.

En primer lugar, a mi director de Tesis, *Dr. Manuel López-Vicente*, mi más gran agradecimiento por haberme confiado este trabajo de investigación en persona, por su valiosa dirección y apoyo para seguir este camino de Tesis y llegar a los buenos resultados y conclusiones del mismo. Cuya experiencia y enseñanza han sido mi fuente de motivación y de curiosidad durante estos meses de estancia.

He realizado este trabajo de investigación, para obtener el Grado del *Master of Science*, en el grupo Manejo del suelo y Cambio Global del Departamento de Suelo y Agua de la Estación Experimental de Aula Dei (EEAD-CSIC), en Zaragoza, al que quiero agradecer la hospitalidad y los medios prestados.

Además, he disfrutado de una beca del *Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza (IAMZ)* durante mis dos años del Máster lo que me ha permitido disfrutar mucho en esta etapa de mi vida. También, me han concedido una beca *ERASMUS+* para realizar una estancia de dos meses, tras la defensa de la Tesis, en un centro de investigación en Padua, Italia. Agradezco esta valiosa oportunidad.

A todos mis compañeros y amigos, estén donde estén, y sin excepción tanto del campus de Aula Dei como de fuera en mi país, gracias.

Todo esto nunca hubiera sido posible sin el amparo incondicional que me concedieron y el cariño que me inspiraron mi familia, sobre todo mi madre *Samia*, mi hermano *Achref* y mi hermana *Nourhène*. Y no puedo olvidar mi amor *Ahmed*, por ese optimismo que siempre me impulsó a seguir adelante que, de forma incondicional, entendió mis malos momentos. Que a pesar de la distancia siempre estuvieron a mi lado para apoyarme y saber cómo iba mi proceso. Las palabras nunca serán suficientes para testimoniar mi reconocimiento y mi agradecimiento.

A todos ustedes, mi mayor aprecio y gratitud.

## II. RESÚMENES

### Resumen

Para desarrollar planes de respuesta hidrológica a escala de cuenca en agro-ecosistemas mediterráneos, tanto en escenarios habituales como desfavorables, resulta primordial conocer el comportamiento de los procesos hidrológicos de generación y circulación de la escorrentía y de la erosión del suelo. Para una mejor comprensión de las dinámicas de estos procesos es necesario conocer las prácticas agrícolas aplicadas en los suelos cultivados, vulnerables frente a la erosión hídrica. Una de las prácticas recomendadas es el uso de cubiertas vegetales en cultivos leñosos, ya que reducen la pérdida de suelo por erosión y mejoran las propiedades físicas y químicas del mismo, ayudando a la sostenibilidad ecológica y económica de los sistemas agrarios. La agricultura mediterránea presenta especializaciones productivas muy marcadas entre las diferentes regiones, siendo los principales cultivos el cereal, olivo, viñedo, almendro y cítricos, en función de las diferentes condiciones edafo-climáticas y de los cultivos tradicionales. En todos ellos la disponibilidad de agua es uno de los principales factores limitantes de la producción. De ahí la necesidad de utilizar las técnicas más avanzadas, como son los modelos de simulación y predicción, desarrollados para obtener tasas espacialmente distribuidas, y ayudar a comprender los procesos y las relaciones entre los factores implicados. Los modelos hidrológicos y de erosión y transporte del suelo son herramientas útiles para evaluar el impacto que los diferentes manejos del suelo y planta tienen sobre las dinámicas espacio-temporales de escorrentía, pérdida y exportación de suelo.

En esta Tesis de Máster se ha aplicado uno de los índices hidrológicos más conocido y aceptado, el índice de conectividad de Borselli, junto con un nuevo índice de conectividad agregado, denominado AIC, que integra un mayor número de procesos. Ambos índices han generado con éxito los mapas de conectividad hidrológica estructural de la cuenca del río Vero (provincia de Huesca, 380 km<sup>2</sup>). El nuevo índice también ha permitido simular la conectividad funcional durante 96 meses, y evaluar el peso relativo de las heterogeneidades de la cuenca seleccionada. El nuevo índice integra información detallada de la topografía, usos del terreno, erosividad de la lluvia, rugosidad de la superficie y capacidad de retención del agua en el suelo. Estas mejoras han resultado en mapas más realistas y representativos de los procesos de conectividad hidrológica tanto estructural como funcional. Los cambios espaciales y temporales se evaluaron en los diferentes usos del suelo y elementos geomorfológicos. La

validación de la simulación con los valores de caudal del río Vero en Barbastro, cerca de la desembocadura, fue satisfactoria entre noviembre y marzo y durante los meses con elevados valores de caudal, y débil en los meses de verano. Estas correlaciones sugieren que las respuestas de escorrentía y sedimentos a escala de cuenca son diferentes a lo largo del año. El nuevo índice se recomienda como una herramienta adecuada y fácil de ejecutar en un entorno de sistemas de información geográfica (SIG) para estudiar las dinámicas espacio-temporales a escala de cuenca y sub-cuencas, así como para evaluar escenarios potenciales de usos y manejo del suelo y planta, y climáticos.

Los viñedos son uno de los cultivos más seriamente afectados por los procesos de erosión hídrica del suelo. En esta Tesis de Máster se ha evaluado la influencia de dos tipos de cubiertas vegetales (vegetación espontánea y cultivo cubierta de esparceta) sobre la humedad del suelo, así como el efecto de diferentes condiciones fisiográficas sobre la generación de escorrentía y exportación de sedimento en un viñedo de secano (Bodegas Fábregas, Huesca) durante 15 meses. Las condiciones de humedad del suelo en las filas de los viñedos fueron secas y estables, en las calles húmedas y con una cierta variabilidad, y húmedas y estables en los pasillos entre los campos. La presencia de esparceta en las calles del viñedo incrementó el contenido de agua en el suelo entre un 62% a un 70% frente a las filas, mientras que las calles con vegetación espontánea presentaron valores un 40% superiores de humedad frente a las filas. Mediante la instalación de dos trampas de escorrentía (ST) en el cauce de dos cárcavas efímeras, se monitorizó la producción de escorrentía y sedimento durante 26 campañas de campo (TIS). Los valores de escorrentía media y máxima fueron de 9,8 y 30,7 l TIS<sup>-1</sup> en ST2 y 13,5 y 30,2 l TIS<sup>-1</sup> en ST3. La turbidez promedio fue de 333 y 19 g l<sup>-1</sup>, y las exportaciones máximas de sedimentos fueron de 41.260 y 2.778 g TIS<sup>-1</sup> en ST2 y ST3. Se identificaron los valores umbrales de precipitación (12 mm) y erosividad de la lluvia (5,2 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> TIS<sup>-1</sup>) para generar escorrentía y pérdida neta de suelo en el viñedo con esparceta. Los cambios en las cubiertas de la vegetación (siega a finales de mayo) y los parámetros de lluvia explicaron las diferentes dinámicas de la escorrentía y del transporte del suelo erosionado.

Tras la consecución de esta Tesis de Máster se evaluarán escenarios de buenas prácticas agro-ambientales en la cuenca del río Vero, en el marco de la Beca *Erasmus+* concedida a la estudiante de la presente Tesis de Máster, en el CNR-IRPI de Padua, Italia, mediante la aplicación de un índice de conectividad hidrológica desarrollado en citado centro de investigación.

## Summary

To develop hydrological response plans at catchment scale in Mediterranean agro-ecosystems, both in frequent and unfavourable scenarios, it is required to understand the behaviour of the different hydrological processes of runoff generation and pathways and soil erosion. For a better understanding of the dynamics of these processes, it is necessary to know the current agricultural practices applied in cultivated soils, which are vulnerable to water erosion, to manage them efficiently and sustainably. One of the recommended practices is the use of plant covers in woody crops, because of the good results at different spatio-temporal scales on the hydrological response of the soil, and therefore for soil and water conservation, and sustainable long-term productivity. The Mediterranean agriculture of the different regions presents marked productive specializations, being the main crops cereals, olives, vineyards, almonds and citrus, depending on the different edapho-climatic conditions and the traditional crops at each region. In all of them, the availability of water is one of the main limiting factors for crop yield. Hence, it is recommended to use the most advanced technological methods, such as the use of prediction models, developed to obtain spatially distributed rates and a better understanding of the role played by the different factors. Hydrological and soil erosion models are useful tools to evaluate the impact of the different soil and vegetation management practices on the spatio-temporal dynamics of runoff, soil erosion and sediment delivery.

In this Master's Thesis, one of the most well-known and accepted hydrological indexes has been applied, the Borselli's connectivity index, as well as a new aggregated index of connectivity (AIC) that integrates a larger number of processes. Both indices successfully generated the maps of structural hydrological connectivity of the Vero River Basin (380 km<sup>2</sup>, province of Huesca, NE Spain). The new index has also made it possible to simulate functional connectivity for 96 months, and to evaluate the relative weight of the heterogeneities of the selected basin. The new index integrates detailed information on topography, land uses, rainfall erosivity, surface roughness and soil water retention capacity. These improvements have resulted in more realistic and representative maps of hydrological connectivity processes, both structural and functional. Spatial and temporal changes were evaluated in the different land uses and geomorphological features. The validation of the simulation was done by using the river flow at the Barbastro gauging station. Results suggested that different runoff and sediment responses took place during the different months of the year. The new index appears as a recommended an easy-to-run tool in a GIS environment to study spatio-temporal



dynamics at catchment scale, as well as to evaluate potential scenarios of soil and plant management, as well as different climatic conditions.

As soil erosion seriously affects vineyards, in this Master's Thesis the effect of two types of plant cover (spontaneous vegetation and cover crop of common sainfoin) on soil moisture and the influence of different physiographic conditions on runoff and sediment yields were evaluated in a rainfed vineyard (Fábregas Cellar; NE Spain) during 15 months. Soil moisture conditions in the vineyards' rows were dry and stable, in the inter-row areas were wet although variable, and wet and very stable in the corridors. Soil moisture in the inter-row areas with common sainfoin was much higher than in the rows (62% - 70%) whereas this difference was lower with spontaneous vegetation (40%). Two runoff and sediment traps (STs) were installed in two ephemeral gullies, and 26 time-integrated surveys (TIS) done. The rainfall threshold for runoff generation was 12 mm and the rainfall erosivity threshold was 5.2 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> TIS<sup>-1</sup>. The mean and maximum runoff yields were 9.8 and 30.7 l TIS<sup>-1</sup> in ST2 and 13.5 and 30.2 l TIS<sup>-1</sup> in ST3. The mean turbidity was 333 and 19 g l<sup>-1</sup>, and the maximum sediment yields were 41,260 and 2,778 g TIS<sup>-1</sup> in ST2 and ST3, respectively. Changes in the canopy covers (grapevines and plant covers) and rainfall parameters explained the runoff and sediment dynamics.

After the Master's Thesis defence, several scenarios of good agro-environmental practices in the Vero River basin will be evaluated, at the CNR-IRPI in Padua, Italy, within the framework of an Erasmus+ Traineeship granted to the student of this Master's Thesis. The software developed by the researchers of this centre will be used to evaluate the selected scenarios.



## Résumé

Afin d'élaborer des plans de réponse hydrologique à l'échelle du bassin dans les agro-écosystèmes méditerranéens, sous les deux scénarios fréquents et défavorables, il est essentiel de connaître le comportement des différents processus hydrologiques de la production et la circulation des eaux de ruissellement et de l'érosion des sols selon différents scénarios hydro-climatiques. Pour une meilleure compréhension de la dynamique de ces processus, il est nécessaire de connaître les pratiques agricoles appliquées dans les sols cultivés, vulnérables à l'érosion hydrique, pour les gérer efficacement et durablement. Une des pratiques de gestion des sols recommandées est l'utilisation de la couverture végétale dans les cultures ligneuses, ce qui donne de bons résultats, à différents échelles spatiotemporelles, sur la réponse hydrologique du sol, et donc la conservation de l'eau et des sols. L'objectif de cette pratique est la préservation des systèmes agraires, ainsi que l'amélioration de la productivité à long terme. À cet égard, l'agriculture méditerranéenne dans les différentes régions présente des spécialisations productives très distinctes, les céréales comme étant les principales cultures, les vignes, les oliviers, les amandiers et les agrumes, en fonction des différents sols et conditions climatiques. Dans tous les cas, la disponibilité de l'eau est l'un des principaux facteurs limitant la production. D'où la nécessité d'intégrer les méthodes technologiques les plus avancées, telles que l'application de modèles de prédiction, développées pour obtenir des cartes et des indices distribués spatialement, et aider à comprendre les processus quelle que soit leur complexité. Les modèles d'érosion du sol et hydrologiques sont des outils utiles pour caractériser et prédire la réponse hydrologique du sol et de l'impact que la gestion différente des sols et des plantes, et l'utilisation des sols sur l'écoulement dynamique spatio-temporel, l'érosion et le transport du sol.

A travers de la présente thèse de maîtrise, a été appliquée l'un des plus connus et acceptés indices hydrologiques, l'indice de connectivité de Borselli, ainsi qu'un nouvel indice agrégé de la connectivité hydrologique (AIC) qui intègre un plus grand nombre de processus. Les deux indices ont généré avec succès les cartes de connectivité hydrologique structurelle du bassin de la rivière Vero (province de Huesca, 380 km<sup>2</sup>). Le nouvel indice a également permis de simuler la connectivité fonctionnelle pendant 96 mois et d'évaluer le poids relatif des hétérogénéités du bassin sélectionné. Le nouvel indice intègre des informations détaillées sur la topographie, l'utilisation des sols, l'érosivité de la pluie, la rugosité de la couche superficielle du sol et la capacité de rétention d'eau dans le sol. Ces améliorations ont abouti à des cartes plus réalistes et plus représentatives des processus de connectivité hydrologique, à la fois

structurelle et fonctionnelle. Les changements spatiaux et temporels ont été évalués dans les différentes utilisations des terres et éléments géomorphologiques. La validation de la simulation avec les valeurs de débit de la rivière Vero à Barbastro a suggéré différentes réponses de ruissellement et de sédiments du bassin tout au long de l'année. Le nouvel indice est recommandé comme un milieu approprié et un outil facile à exécuter dans un environnement SIG pour étudier la dynamique à l'échelle du bassin spatio-temporelle, et d'évaluer les scénarios possibles d'utilisation et gestion des sols et des plantes, ainsi que des conditions climatiques.

Nul doute que, l'érosion des sols affecte gravement les vignes. Dans ce mémoire de maîtrise, nous avons étudié l'influence de deux plantes de couverture végétale, sur l'humidité du sol ainsi que l'effet des différentes conditions sur la génération du ruissellement et de sédiments ont été évaluées dans des champs de vigne en pluvial (NE Espagne) pendant 15 mois. Un champ avait une végétation spontanée comme couverture végétale du sol, tandis que les trois autres champs avaient une culture de sainfoin commun. Les conditions d'humidité du sol dans les lignes des vignes étaient sèches et stables, dans les zones d'interligne étaient humides mais très variables et des conditions humides et très stables se trouvent dans les couloirs. L'humidité du sol dans les zones d'interligne avec le sainfoin commun était beaucoup plus élevée que dans les lignes (62% - 70%) alors que cette différence était plus faible avec la végétation spontanée (40%). Deux pièges des eaux de ruissellement et sédiments (ST) ont été installés dans deux ravines éphémères et 26 sondages intégrés dans le temps (TIS) ont été réalisés. Les exportations moyennes et maximales de ruissellement étaient de 9,8 et 30,7 l TIS<sup>-1</sup> dans ST2 et de 13,5 et 30,2 l TIS<sup>-1</sup> dans ST3. La turbidité moyenne était de 333 et 19 g l<sup>-1</sup> et les exportations maximales des sédiments étaient de 41 260 et 2 778 g TIS<sup>-1</sup> dans ST2 et ST3, respectivement. Les changements dans les couvertures de la canopée (vignes et couvertures végétales) et les paramètres pluviométriques expliquent la dynamique des écoulements et des sédiments.

Enfin, et après la réalisation de ce mémoire, des scénarios de bonnes pratiques agroenvironnementales dans le bassin de la rivière Vero seront étudiés, dans le cadre de la bourse Erasmus + accordée à l'étudiante de cette thèse de maîtrise, au CNR- IRPI de Padoue, Italie. La planification et la gestion correctes des ressources naturelles de base des systèmes agricoles, tels que le sol et l'eau, sont essentielles pour assurer la durabilité de la production agricole, comprise comme la somme de sa viabilité économique et de sa stabilité sociale et environnementale.

## III. ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Estado de la cuestión y revisión bibliográfica	2
1.1.1. Procesos hidrológicos a escala de cuenca en agro-ecosistemas mediterráneos	2
1.1.2. Conservación de suelo y agua en cultivos leñosos mediante el uso de cubiertas vegetales	12
1.1.3. Contexto productivo y económico de los principales cultivos en los países del arco mediterráneo	27
1.1.4. Caracterización de la respuesta hidrológica del suelo y de la erosión mediante el uso de modelos y medidas en campo	37
1.1.5. Referencias bibliográficas	47
1.2. Objetivos, tareas y marco de la investigación	58
1.2.1. Hipótesis de trabajo y objetivos	58
1.2.2. Tareas	59
1.2.3. Proyecto de investigación en el que se encuadra la Tesis de Máster	62
1.2.4. Relación de la Tesis de Máster con el área de especialización del Programa ' <i>Master of Science</i> '	62
CAPÍTULO 2. MODELIZACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL MEDIANTE UN NUEVO ÍNDICE EN LA CUENCA HIDROLÓGICA DEL RÍO VERO	65
2.1. Artículo científico: objetivo, resumen y revista	66
2.1.1. Objetivo y tareas	66
2.1.2. Resumen del artículo en español	66
2.1.3. Revista seleccionada	67
2.2. Artículo científico: manuscrito	68
2.3. Contribución de los autores	108

CAPÍTULO 3. CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA MEDIANTE CUBIERTAS VEGETALES EN VIÑEDOS DE SECANO	109
3.1. Artículo científico: objetivos, resumen y revista	110
3.1.1. Objetivos y tareas	110
3.1.2. Resumen del artículo en español	110
3.1.3. Revista seleccionada	112
3.2. Artículo científico: manuscrito	113
3.3. Contribución de los autores	138
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES, CONTRIBUCIÓN CIENTÍFICA E INVESTIGACIÓN FUTURA	139
4.1. Conclusiones	140
4.2. Contribución científica y social de la Tesis de Máster	143
4.3. Investigación futura: Evaluación de escenarios de Buenas Prácticas Agrícolas y Ambientales	145
4.3.1. Beca Erasmus+: estancia breve en el IRPI-CNR, Padua, Italia	145
ANEXO	148
A. Herramientas informáticas utilizadas	149