



## Zonificación del uso potencial agrícola en la cuenca media del río Luján, Argentina

### *Zoning the potential agricultural use in the middle basing of Lujan river, Argentina*

**Montes Galbán, Eloy**

Instituto de Investigaciones Geográficas - Universidad Nacional de Luján / Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).  
Universidad Nacional de Luján, Argentina. [emontesgalban@gmail.com](mailto:emontesgalban@gmail.com)

#### Palabras clave

Uso potencial agrícola  
Evaluación multicriterio  
Sistemas de Información Geográfica  
Cuenca media del río Luján

#### Keywords

Potential agricultural use  
Multi-criteria evaluation  
Geographic information systems  
Middle basin of the Lujan river

#### RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo determinar las zonas con potencial aptitud agrícola en la cuenca media del río Luján, Argentina. Para lograr el objetivo propuesto se llevó a cabo un análisis de evaluación multicriterio [EMC] apoyado en el uso de Sistemas de Información Geográfica [SIG]. A partir del tratamiento de datos geoespaciales con métodos de EMC se logró integrar una serie de capas temáticas en formato raster que dan cuenta de factores y restricción de carácter agronómico, socioeconómico y ambiental. Como resultado principal se obtuvo un mapa síntesis con la zonificación del uso potencial agrícola representado en cinco clases de aptitud (Muy apta, Apta, Moderadamente apta, Marginalmente apta y No apta). Los resultados constituyen un aporte de los estudios geográficos para soportar la toma de decisiones y conducir las acciones en el territorio de acuerdo con su aptitud potencial, permitiendo alcanzar el mayor equilibrio entre los factores ambientales, económicos y sociales.

#### ABSTRACT

This paper work aims to determinate the potential zones with agricultural activities highest aptness level in the middle Lujan river basin, Argentina. To achieve the goal, a multi-criteria evaluation analysis was carried out, by using the geographic information systems [GIS]. Based on the geospatial data using the MCA methods it was possible to integrate a series of thematic layers in raster format that account for factors and restrictions in the agronomic, socioeconomic and environmental ways. As the main result, it was obtained a synthesis map with the zoning of soil aptness level represented in five aptitude levels (very apt, apt, moderately apt, very little apt and unapt). The results constitute a contribution from geographic studies to support decision-making and conduct actions in the field according to the potential aptness, admitting to achieve the best balance between environmental, economic and social factors.

Recibido: 22/11/2022

Aceptado: 19/12/2022

## 1. Introducción

La planificación, diseño de programas y proyectos para el manejo y la gestión de las actividades agrícolas en el contexto de las cuencas hidrográficas, debe realizarse sobre la base de estudios que contemplen la interacción entre variables biofísicas, ambientales y socio-económicas, de forma que el uso que se haga del suelo sea óptimo y, cumpla con la premisa de obtener máximos beneficios con mínima degradación.

La modelación del uso potencial agrícola implica determinar los diferentes grados de aptitud del suelo, esto a su vez debe constituir una prioridad al momento de planificar el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales en las cuencas hidrográficas, ya que al utilizar el suelo de acuerdo con su aptitud potencial permite alcanzar el mayor equilibrio entre los factores ambientales, económicos y sociales ([Young & Dent, 1995](#)).

Lo antes expuesto, justifica las investigaciones que apuntan a generar y validar conceptos, métodos y técnicas cada vez más eficaces al momento de medir y predecir el uso potencial de un territorio.

Los métodos de evaluación multicriterio [EMC] integrados en los SIG se han probado en numerosos estudios con orientación hacia esta temática, quedando demostrada su viabilidad, especialmente cuando se trata de definir zonas potenciales con diferentes grados de aptitud agrícola, para lo cual se requiere de la selección de un conjunto de criterios que respondan a las propiedades intrínsecas, extrínsecas, y de nivel de manejo del suelo.

El presente trabajo tiene como objetivo determinar las zonas con potencial aptitud agrícola en la cuenca media del río Luján, Argentina. El objetivo propuesto se logra a través de un análisis de EMC aplicado a una serie de factores y restricciones que obedecen a las dimensiones: agronómica, socioeconómica y ambiental. El resultado principal se presenta en forma de cartografía síntesis que da cuenta de la distribución espacial de las zonas potenciales por niveles de aptitud (Muy apta, Apta, Moderadamente apta, Marginalmente apta y No apta). Los resultados obtenidos son parte fundamental en futuras fases de investigación, en la cual se buscará contrastar la distribución espacial del uso potencial agrícola con el uso actual del territorio, posibilitando avanzar en la evaluación de la viabilidad de alternativas e implementación de programas y planes de desarrollo agrícola que contemplen la conservación de los suelos en el contexto de las cuencas hidrográficas como unidades de análisis.

## 2. Antecedentes

Como antecedentes en la temática existen trabajos de reciente data desarrollados en países de la región de Iberoamérica, dentro de los cuales cabe mencionar [Santé Riveira & Crecente Maseda \(2005\)](#) con la 'Evaluación de métodos para la obtención de mapas continuos de aptitud para usos agroforestales', en este trabajo los autores después de una revisión de metodologías existentes en la temática, obtienen mapas continuos de aptitud con fines de planificación espacial de los usos del suelo. En cuanto a los antecedentes sobre la aplicación de métodos de análisis de evaluación multicriterio para la obtención de mapas de uso potencial agrícola, destacan los trabajos de [Aguilar Rivera et al. \(2010\)](#) con la 'Evaluación multicriterio y aptitud agroclimática del cultivo de caña de azúcar en la región de Huasteca (México)'; [Pérez et al. \(2010\)](#) con una 'Propuesta de un modelo de evaluación multicriterio para la incorporación de lodos de depuradora en suelos agrícolas'; asimismo [Espejel García et al. \(2015\)](#) avanzan con la 'Determinación del uso potencial agrícola mediante modelación geoespacial y análisis multicriterio para la cuenca Balsas Mezcala', en los antecedentes mencionados se obtuvieron resultados favorables a través de la aplicación de Tecnologías de la Información Geográfica (Sistemas de Información Geográfica, Teledetección y Cartografía Digital) orientados a modelar información geográfica específica para la planeación de las actividades agrícolas a escala local y regional.

En el ámbito de estudio de la Argentina y dentro de la línea de análisis espacial con SIG, se pueden mencionar el trabajo de [Buzai \(2011\)](#) 'Determinación de zonas de potencial conflicto entre usos del suelo en el partido de Luján, Provincia de Buenos Aires, Argentina', donde se presentan diferentes mapas de aptitudes (urbana, agrícola, conservación), a partir de la implementación de evaluación multicriterio y método LUCIS, lo que permite determinar las zonas donde es factible tener potenciales conflictos entre usos del suelo, en esta misma línea y con un avance en el modelado hacia futuro (2030) el mismo autor publica 'Crecimiento urbano y potenciales conflictos entre usos del suelo en el municipio de Luján (Provincia de Buenos Aires, Argentina). Modelado espacial 2016-2030' ([Buzai, 2018a](#)). Entre los trabajos más recientes

en la temática con una ampliación del área de estudio, están los resultados publicados por [Buzai y Principi \(2017\)](#) 'Identificación de áreas de potencial conflicto entre usos del suelo en la cuenca del río Luján, Argentina' y, [Principi \(2017\)](#) 'Avances para la obtención del mapa de aptitud agrícola en la cuenca del río Luján con evaluación multicriterio', en ambos trabajos se replica la metodología ya descrita, logrando un avance en la ampliación de escala espacial, presentando resultados a escala regional para toda la cuenca del río Luján.

Por último, cabe destacar que se realizaron trabajos previos ([Montes Galbán, 2019](#); [Montes Galbán, 2020](#)) que aportaron a la construcción de la base de datos temática necesaria para la presente investigación, los mencionados trabajos tuvieron como propósito el diagnóstico territorial de los recursos naturales (suelos, agua y vegetación) en la cuenca media del río Luján, mediante el uso combinado de las Tecnologías de la Información Geográfica (SIG, Teledetección, Cartografía digital) bajo un enfoque geográfico.

### 3. Marco teórico-conceptual

#### 3.1. Geografía y análisis de EMC

Los estudios geográficos pueden tener dos orientaciones generales, aquellos que apuntan a la obtención de un cuerpo de conocimientos racionales y sistemáticos (Geografía como ciencia pura) y los que buscan aplicar esos conocimientos en la resolución de problemas prácticos que generen acciones tendientes a cambiar la realidad geográfica (Geografía Aplicada). En este caso se busca explotar la segunda de estas posibilidades con miras a realizar aportes en lo referente a la evaluación, planificación y gestión del territorio.

Partiendo de la consideración anterior, el presente trabajo se fundamenta en los supuestos epistemológicos del materialismo sistémico ([Bunge, 2014](#)), logrando su operacionalización a través de la Geografía Aplicada sus métodos y técnicas, que se basa actualmente en el análisis espacial cuantitativo con SIG y su focalización es empírica ([Buzai, 2018b](#)).

Asimismo, se parte de experiencias desarrolladas en dos campos de estudios geográficos bien definidos. En primer lugar, la tradición de la Geografía que permite la construcción de regiones geográficas formales a través de la superposición de capas temáticas, logrando de esta manera la integración de variables hacia una síntesis del espacio estudiado.

En segundo lugar, la Geografía Cuantitativa a través de la incorporación de conceptos y procedimientos de Evaluación Multicriterio que se hacen operativos mediante los SIG ([Voogd, 1983](#); [Carver, 1991](#); [Malczewski \(1999\)](#); [Gómez Delgado & Barredo Cano, 2005](#); [Buzai & Baxendale, 2011](#); [Eastman, 2012](#)).

#### 3.2. Sistemas de evaluación de Tierras

De acuerdo a la conceptualización de la [Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, [FAO \(1976\)](#)] el proceso de 'Evaluación de tierra' abarcaría el concepto de 'suelo', la evaluación de tierras se designa como un concepto integrado considerando los factores agrícolas, sociales, económicos y otros recursos más allá del suelo (como el agua y clima).

Sin embargo, para los efectos de la presente investigación se entiende el proceso de evaluación de las tierras con propósitos agrícolas, aquella que tiene por "...finalidad definir unidades agrícolas y en la medida predecir el rendimiento de la tierra para usos generales, y sobre esa base planificar y diseñar los programas, proyectos y actividades para el manejo y la gestión de la cuenca en estudio" ([Watler, 2017, p. 1](#)).

Asimismo, desde lo teórico-metodológico se toman, por un lado, elementos conceptuales del esquema de evaluación de tierras de la [FAO \(1976\)](#) a modo orientativo para la generación de las clases de 'aptitud' finales (ver apartado metodológico). Por otro lado, se tomaron aspectos metodológicos sobre la Zonificación Agro-ecológica para evaluación de recursos naturales ([FAO, 1997](#)) al momento de establecer los valores de corte para la normalización de los factores agronómicos y ambientales.

## 4. Marco metodológico

### 4.1. Descripción del área de estudio

El área de estudio se basa en la definición espacial de la cuenca media del río Luján ([Figura 1](#)) realizada en trabajos técnicos previos ([Montes Galbán, 2022](#)), comprende una superficie de 611,58 km<sup>2</sup>, y se encuentra atravesada por el río Luján con una orientación sudoeste – noreste, desde un punto de vista político-administrativo se sitúa en la provincia de Buenos Aires, contenida en 5 unidades espaciales que corresponden a los partidos: Exaltación de la Cruz, General Rodríguez, Luján, Mercedes y Pilar, los cuales tienen coincidencia espacial con los Municipios. Las mencionadas jurisdicciones tienen una población total de 585.624 habitantes según datos del último Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas del año 2010 [Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina ([INDEC, 2015a](#))].

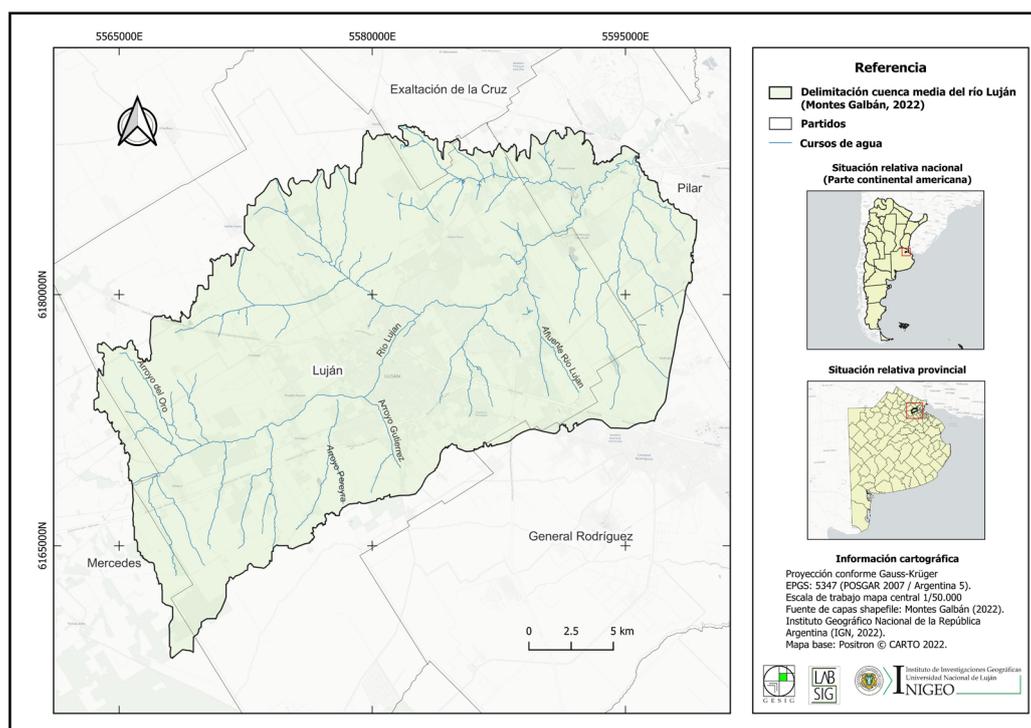
El área de estudio se ubica en un clima clasificada como ‘templado húmedo’, siendo la precipitación media anual de 946 mm y la temperatura media anual de 16,4 °C. ([Irizar & Andriulo, 2017](#)). La vegetación natural dominante en la región Pampeana es de pastizales, caracterizados por una estepa gramínea o también denominado flechillar típico, correspondiendo a la denominada provincia Fitogeográfica Pampeana ([Cabrera, 1976](#)). Sin embargo, [Pereyra & Ragas \(2021\)](#) afirman:

...que debido a la gran influencia de las actividades antrópicas en la Región Metropolitana Bonaerense (tanto por actividades agropecuarias, como urbanas) es necesario considerar que la vegetación natural ha desaparecido total o parcialmente, quedando relictos de las mismas. A ello se le fueron sumando a lo largo del tiempo, especies exóticas que colonizaron rápidamente la región. (p. 6)

En cuanto al relieve es suavemente ondulado con sectores deprimidos. La Región Pampeana es una unidad heterogénea de bajo relieve relativo debido en gran medida al accionar del proceso eólico, configurando una planicie loésica. ([Pereyra & Ragas, 2021](#)). En la cuenca estudiada las mayores elevaciones rondan los 43 m s. n. m. y las menores 3,68 m s. n. m. con pendientes promedio de 1,27 %. Los suelos típicos de la zona corresponden a Argiudoles de textura franco limosa [Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria ([INTA, 2022a](#))].

En cuanto al sistema de producción que destaca en esta región de la Pampa (al norte de Buenos Aires), es la agricultura continua bajo siembra directa [SD] con especies de ciclo primavero-estival, fundamentalmente soja y secundariamente maíz, ocupando aproximadamente 70% y 15% de la superficie agrícola, respectivamente ([Irizar & Andriulo, 2017](#)).

**Figura 1.** Localización de la cuenca media del río Luján.



Fuente: Elaboración propia mediante el software TerrSet versión 18.31. ([Clark University, 2017](#)) y el software QGIS versión 3.26.3-Buenos Aires ([QGIS Development Team, 2022](#)).

## 4.2. Procedimiento de evaluación multicriterio

En este caso la Evaluación Multicriterio tiene como propósito cubrir 'un objetivo' a través de la evaluación de múltiples criterios ([Voogd, 1983](#)). De las alternativas metodológicas que existen, se trabajó con la denominada combinación lineal ponderada (WLC). [Eastman \(2012\)](#) la describe como:

...una serie de criterios continuos (factores) son estandarizados en un rango numérico común, y luego combinados por medio de un promedio ponderado. El resultado es un mapeo de adecuación continuo que luego puede ser enmascarado por una o más restricciones booleanas para dar lugar a los criterios cualitativo, y finalmente se impone un umbral para producir una decisión final. (p. 131)

El procedimiento que se sigue parte de las sistematizaciones metodológicas descritas en [Gómez Delgado & Barredo Cano \(2005\)](#); [Buzai & Baxendale \(2011\)](#) y [Eastman \(2012\)](#). Los procedimientos estadísticos, análisis espacial cuantitativo y salidas cartográficas finales se realizaron en los entornos informáticos de los programas TerrSet versión 18.31. ([Clark University, 2017](#)) y QGIS versión 3.26.3-Buenos Aires ([QGIS Development Team, 2022](#)). El tratamiento realizado a los datos, se puede agrupar y resumir en cinco fases procedimentales descritas a continuación.

### 4.2.1 Selección de criterios y fuente de datos

Los criterios seleccionados (factores y restricciones) tienen que ver, por un lado, con la pertinencia y funcionalidad, para lo cual fue necesario un análisis previo de los aspectos conceptuales relacionados con la problemática objeto de estudio; por otro lado, con la disponibilidad y confiabilidad de la información, lo cual tiene que ver con la existencia y procedencia de los datos.

Como se observa en la [Tabla 1](#), los factores se agruparon en función de criterios agronómicos, socioeconómicos y ambientales (columna 2), sumando en un primer grupo siete (7) factores y; en un segundo grupo, se observan las restricciones, conformadas por dos (2) limitaciones que obedecen a: 'limitaciones actuales del uso de la tierra' y la 'limitación establecida por la divisoria de agua' como definición espacial del área de estudio. En la tercera columna de la tabla se detallan cada uno de los factores y restricciones (subcriterios) intervinientes en el análisis, sumando un total de nueve (9). En la cuarta y quinta columna se presenta una descripción de las fuentes primarias de los datos y el pre-tratamiento que se realizó para obtener el conjunto de capas de información geográfica.

**Tabla 1.** Criterios seleccionados (factores y restricciones).

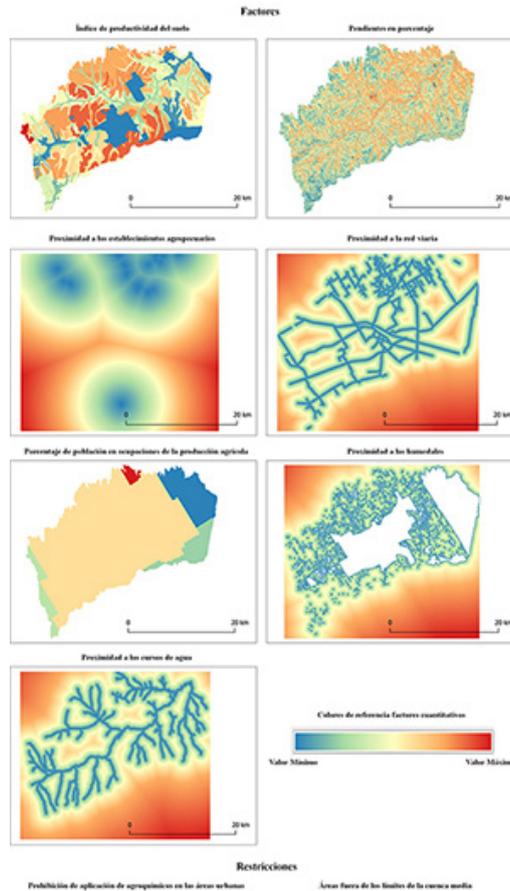
Tipo de criterio	Criterios	Subcriterios	Descripción	Fuentes
Factores	Agronómicos	Índice de productividad del suelo (IP)	El IP es un índice de productividad paramétrico multiplicativo para evaluar la productividad actual y potencial del suelo. Su filosofía es que la productividad agraria de los suelos, bajo condiciones óptimas de manejo, depende de las características intrínsecas de los mismos ( <a href="#">Riquier, et al., 1970</a> ). El sistema fue adaptado por <a href="#">Sobral &amp; Nakama (1988)</a> para las condiciones de la Región Pampeana con modificaciones para las condiciones locales. El resultado muestra los niveles de productividad con valores entre 0-100.	<a href="#">INTA (2022a)</a>
		Gradiente de pendiente	Capa de pendientes en % obtenida a través del procesamiento del Modelo Digital de Elevación (datos de origen LIDAR - resolución espacial 5 metros). El gradiente de pendiente es determinante sobre la formación del suelo, por su efecto sobre el drenaje, el escurrimiento y la erosión.	Elaboración propia en base a [Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina, <a href="#">IGN (2021)</a> ]
	Socioeconómicos	Proximidad a los establecimientos agropecuarios	Determinación de la distancia en metros entre los suelos con aptitud agrícola y los establecimientos agropecuarios. Factor socioeconómico que es indicador de la intensidad de capital y disponibilidad de infraestructura.	Elaboración propia en base a <a href="#">IGN (2022)</a>

		Proximidad a la red viaria	Determinación de la distancia en metros entre los suelos con aptitud agrícola y la red viaria (red viaria primaria, secundaria y terciaria). Factor con repercusión socioeconómica por ser indicador de la accesibilidad, cuanto menor sea esta distancia, mayor será la accesibilidad a los centros de provisión de insumos y a los mercados.	Elaboración propia en base a <a href="#">IGN (2022)</a>
		Porcentaje de población en ocupaciones de la producción agrícola	Capa generada a partir del cálculo de población en ocupaciones de la producción agrícola (Población en ocupaciones de la producción agrícola / Población total) * 100. Factor indicador de la intensidad de mano de obra, cuanto mayor sea el porcentaje, mayor cobertura de requerimientos para la actividad agrícola y mayor impacto positivo en los niveles de empleo.	Elaboración propia en base a datos del <a href="#">INDEC (2015a;b)</a>
	Ambientales	Proximidad a los humedales	Determinación de la distancia en metros entre los suelos con aptitud agrícola y los humedales. Cuanto mayor sea esta distancia a los humedales, tendrá menor riesgo de contaminación.	Elaboración propia en base a <a href="#">INTA (2022b)</a>
		Proximidad a los cursos de agua	Determinación de la distancia en metros entre los suelos con aptitud agrícola y los cursos de agua. Cuanto mayor sea esta distancia a los cursos de agua, tendrá menor riesgo de contaminación.	Elaboración propia en base a <a href="#">IGN (2022)</a>
Restricción	Limitaciones actuales del uso de la tierra	Prohibición de aplicación de productos agroquímicos y/o plaguicidas con destino al uso agropecuario en las áreas urbanas	Capa definida a partir de lo establecido en el artículo 5 ( <a href="#">Ordenanza N° 5953 de 2011</a> ) sobre la prohibición de aplicaciones de productos agroquímicos y/o plaguicidas en las áreas urbanas. Se generó un Buffer de (500) metros del perímetro de las áreas urbanizadas y zonas de población consolidada, para lo cual se requirió previamente de una capa con la cobertura urbana.	Elaboración propia en base a <a href="#">Zanaga et al. (2021)</a> ; <a href="#">Ordenanza N° 5953 de 2011</a> .
	Limitación establecida por la divisoria de agua	Áreas fuera de los límites de la cuenca media	Delimitación de la cuenca media del río Luján.	<a href="#">Montes Galbán (2022)</a>

Fuente: Elaboración propia.

En la [Figura 2](#), es posible observar las nueve (9) capas de información geográfica generadas en formato raster a partir del procesamiento de los datos primarios detallados en la tabla anterior. Las capas se llevaron a una resolución espacial con celdas de aproximadamente 10 x 10 metros. Se realizaron reproyecciones cartográficas hasta tener todas las capas del proyecto en el EPSG: 5347, POSGAR 2007 / Argentina 5, esto permitió unificar toda la base de datos espacial bajo un mismo sistema de referencias de coordenadas planas (Proyección conforme Gauss-Krüger) lo que facilitó los posteriores procesamientos.

**Figura 2.** Capas de información geográfica: factores y restricciones.



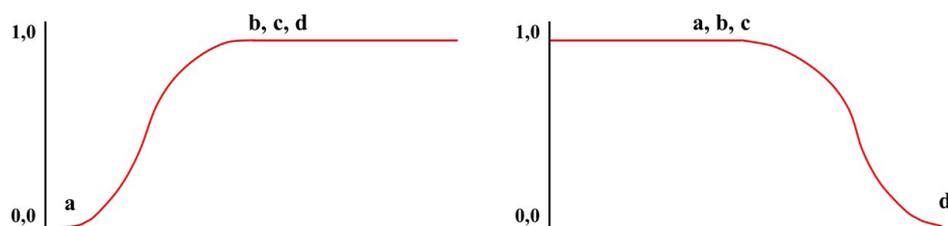
Fuente: Elaboración propia mediante el software TerrSet versión 18.31. ([Clark University, 2017](#)) y el software QGIS versión 3.26.3-Buenos Aires ([QGIS Development Team, 2022](#)).

#### 4.2.2. Normalización de los factores

Cada uno de los factores fue estandarizado utilizando la técnica de los Grupos Difusos, los cuales son grupos sin límites bien marcados, es decir la transición entre la pertenencia y la no pertenencia de una posición en el grupo es gradual, según Zadeh (citado en [Eastman, 2012](#)). Esto se logró a través del módulo 'FUZZY' del software TerrSet ([Clark University, 2017](#)). Todos los factores quedaron estandarizados de acuerdo a un grado de pertenencia difusa (también llamado posibilidad) que oscila entre 0,0 y 1,0, indicando un aumento continuo de la no pertenencia a la pertenencia completa ([Eastman, 2012](#)).

Asimismo, [Eastman \(2012\)](#) afirma, que los Grupos Difusos brindan una rica base matemática para entender problemas de decisión y para construir reglas de decisión en la evaluación y combinación de criterios. El procedimiento implica construir funciones de pertenencia al momento de estandarizar cada uno de los factores. Existen varias funciones adecuadas para definir grados de pertenencia, en este caso se eligió la función sigmoideal (con forma de 's') creciente y decreciente ([Figura 3](#)), siendo una de las más utilizadas en la teoría de Grupos Difusos, consiste en una función coseno que requiere de cuatro puntos (puntos de inflexión) para definir la forma de la curva (a, b, c, d) ([Eastman, 2012](#)).

**Figura 3.** Función de membresía sigmoideal monotónicamente creciente y decreciente.



Fuente: Elaboración propia.

En la [Tabla 2](#), se puede observar la forma que adopta la función de membresía (creciente o decreciente). Asimismo, se recogen los valores de corte (puntos de inflexión) que configuran la curva para cada factor, los cuales derivan de la revisión bibliográfica y la consulta a expertos. Los valores comprendidos entre estos máximos y mínimos se ponderarán entre los normalizados de 0 y 1, mientras que aquellos registros que en la realidad presenten cifras superiores al máximo valor de utilidad, serán ajustados a 1, y en el caso contrario ajustados a 0.

El factor índice de productividad del suelo [IP], es un ejemplo del caso monotónicamente creciente, corresponde a valores de IP donde el intervalo de 0 a 30 tendrá valor de adecuación 0, en el de 30 a 77 los valores se reescalarán entre el rango de 0 a 1, siendo 77 el máximo valor de IP para el área de estudio. El valor mínimo de utilidad de '30' se estableció con base a bibliografía especializada que sugiere los IP mayores e iguales a 30 como categorías que van de 'media' a 'excelente' productividad del suelo con fines agrícolas ([Riquier, et al., 1970](#); [Sobral & Nakama, 1988](#)).

Un ejemplo del caso monotónicamente decreciente, es el factor gradiente de pendiente, que corresponde a valores de pendiente en % donde el intervalo de 0 a 0,5 tendrá valor de adecuación 1, en el de 0,5 a 16 los valores se reescalarán entre el rango de 1 a 0 y a partir de 16 y superiores les corresponderá el valor 0. Los valores de utilidad de las pendientes fueron establecidos a partir de la consulta de bibliografía especializada, tomando en consideración aquellas pendientes del terreno que no ofrece dificultad o dificultad moderada para la utilización de maquinaria agrícola e implementación de prácticas de manejo de baja complejidad ([FAO, 2009](#); [FAO, 1997](#); [Department of Agriculture de EE. UU., [USDA \(1965\)](#)]).

Los valores de los puntos de inflexión de los factores 'proximidad a los establecimientos agropecuarios', 'proximidad a la red viaria' y 'porcentaje de población en ocupaciones de la producción agrícola' fueron establecidos a partir de los mínimos y máximos medidos para cada variable en el área de estudio.

En el caso de la 'proximidad a los humedales' y la 'proximidad a los cursos de agua', el valor de  $a=100$  metros, fue definido a partir del artículo 7 ([Ordenanza N° 5953 de 2011, p. 2](#)), el cual establece que para la protección de cursos y cuerpos de agua se "...deberá respetar un radio libre de cien (100) metros contados a partir del perímetro del curso y a cada lado del mismo" ([Ordenanza N° 5953 de 2011, p. 2](#)); por otro lado, el valor de 'b' se fijó a partir del máximo valor medido en la variable.

**Tabla 2.** Valores de corte para la normalización de los factores mediante Fuzzy.

Factores	Tipo y forma de la función de membresía	Unidades de medida	Valores de los puntos de inflexión			
			a	b	c	d
Índice de productividad del suelo	Función sigmoideal monotónicamente creciente	Valores de IP	30	77	-----	-----
Gradiente de pendiente	Función sigmoideal monotónicamente decreciente	Pendiente en %	-----	-----	0.5	16
Proximidad a los establecimientos agropecuarios	Función sigmoideal monotónicamente decreciente	Metros	-----	-----	0	18.628
Proximidad a la red viaria	Función sigmoideal monotónicamente decreciente	Metros	-----	-----	0	14.382

Porcentaje de población en ocupaciones de la producción agrícola	Función sigmoideal monotónicamente creciente	% de población	0,37	1,56	-----	-----
Proximidad a los humedales	Función sigmoideal monotónicamente creciente	Metros	100	14.594	-----	-----
Proximidad a los cursos de agua	Función sigmoideal monotónicamente creciente	Metros	100	15.720	-----	-----

Fuente: Elaboración propia con base en [Ordenanza N° 5953 de 2011](#); [FAO \(2009; 1997\)](#); [Sobral & Nakama \(1988\)](#); [Riquier, et al. \(1970\)](#); [Department of Agriculture de EE. UU., [USDA \(1965\)](#)].

Otro de los elementos que fue necesario introducir en el modelo son los criterios concernientes a las restricciones (limitantes), para lo cual se generaron capas booleanas, es decir las áreas excluidas de la evaluación se codificaron con 0 y aquellas incluidas con 1.

#### 4.2.3 Ponderación (pesos) de los factores

Para la asignación de pesos a los factores se seleccionó el Método por Ranking Recíproco (Rank Reciprocal Method) debido a su simplicidad de cálculo y a la efectividad demostrada si se le compara con métodos similares ([Buzai & Baxendale, 2011](#)), su aplicación se realiza a través de la [Ecuación 1](#).

**Ecuación 1.** Cálculo de ponderaciones por ranking recíproco

$$w_j = \frac{\frac{1}{r_j}}{\sum \frac{1}{r_j}}$$

Donde:  $w_j$  es el valor de ponderación otorgado a cada factor de la vulnerabilidad;  $r_j$  es el número de orden (ranking) que se le brinda a cada factor de la vulnerabilidad de acuerdo a su importancia.

En la primera columna de la [Tabla 3](#) se formula un ranking de importancia para cada factor de la vulnerabilidad, donde el factor más importante adquiere el valor 1, el segundo en importancia el valor 2 y así sucesivamente, luego en la segunda columna se estandarizan los valores y, por último, cada valor proporcional se divide por el valor de sumatoria de las proporciones ([Buzai & Baxendale, 2011](#)).

En este caso, para asignar el nivel de importancia de los criterios (factores) se consultó la opinión de expertos y se realizó una extensa revisión de bibliográfica. El primer nivel de importancia se asignó al criterio agronómico, con atención especial en los factores que miden principalmente las propiedades intrínsecas del suelo (físicas y químicas), por constituir el recurso natural en torno al cual gira el desarrollo de la actividad agrícola. Específicamente el 'índice de productividad del suelo' que da cuenta de la productividad actual y potencial del suelo. Dentro de los criterios agronómicos, se estableció un segundo nivel (2) de importancia al factor gradiente de pendiente, cabe destacar que este factor tiene una doble incidencia, por un lado, su efecto sobre el drenaje y el escurrimiento y como define esto la formación del suelo y por ende lo relativo a su manejo; por otro lado, la degradación del suelo que se puede generar por efectos de la erosión.

En cuanto a los criterios 'ambientales' incluidos en la evaluación, se le asignó el valor de importancia 2, seguidos por los criterios socioeconómicos, con un nivel de importancia 3.

**Tabla 3.** Ponderaciones por el método ranking recíproco.

Factores	Ranking	Ranking recíproco	Ponderación (Pesos)
Índice de productividad del suelo	1	1	0.287
Gradiente de pendiente	2	0.5	0.143
Proximidad a los establecimientos agropecuarios	3	0.33	0.094
Proximidad a la red viaria	3	0.33	0.094
Porcentaje de población en ocupaciones de la producción agrícola	3	0.33	0.094
Proximidad a los humedales	2	0.5	0.143
Proximidad a los cursos de agua	2	0.5	0.143
		3,49	1,00

Fuente: Elaboración propia con base en [Malczewski \(1999\)](#); [Buzai y Baxendale \(2011\)](#).

#### 4.2.4 Integración de los factores de aptitud

Entre las técnicas utilizadas en los análisis EMC destacan aquellas que se clasifican como aditivas/ponderadas, una de las más empleadas es la Combinación lineal ponderada (Weighted Linear Combination) la cual ha sido probada de manera satisfactoria en diversas investigaciones sobre evaluación multi-criterio ([Gómez Delgado y Barredo Cano, 2005](#)).

En este caso, se eligió la Combinación lineal Ponderada por ser una técnica sencilla e intuitiva que permite la integración de los diferentes criterios considerados para la obtención de la distribución espacial de los niveles de aptitud agrícola. Su cálculo se logra a través de la [Ecuación 2](#).

Ecuación 2. Combinación lineal ponderada

$$S = \sum w_i x_i * \prod c_j$$

Donde: es el nivel de adecuación; ponderación (peso) del factor i; valor del factor i; valor del criterio de restricción;  $\prod$  producto.

#### 4.2.5 Clasificación de las zonas potenciales por niveles de aptitud

Finalmente, la escala cuantitativa que se obtiene del paso anterior se clasificó en cuatro clases de aptitud agrícola. Los rangos para la medición de la aptitud van de 0 a 1, donde 0 representa lo 'No apto' y 1 lo 'Muy apto'. Para definir las categorías cualitativas de aptitud, se tomó a modo orientativo la propuesta de [FAO \(1976\)](#), quedando el mapa de aptitud final clasificado de acuerdo con los rangos y categorías establecidas en la Tabla

**Tabla 4.** Grados de aptitud agrícola.

Clasificación cuantitativa	Clasificación cualitativa
0,0	No apta
De 0,1 a 0,5	Marginalmente apta
De 0,51 a 0,7	Moderadamente apta
De 0,71 a 0,85	Apta
De 0,86 a 1,0	Muy apta

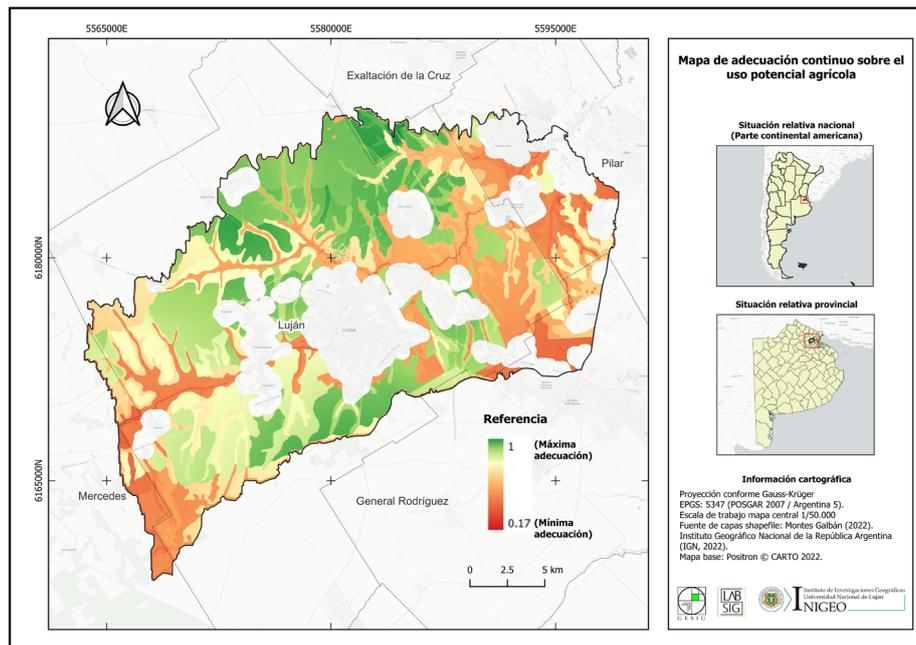
Fuente:Elaboración propia.

## 5. Resultados

La ejecución de la secuencia de procedimientos del modelo permite obtener en una primera instancia un resultado que corresponde al mapa de adecuación continuo sobre el uso potencial agrícola (Figura 4). El contenido del mapa se representa con los colores estilo 'semáforo' en el cual se observa con tonos verde aquellas áreas con mayor aptitud para la agricultura y con tonos rojos las áreas de menor aptitud.

Las zonas de colores rojo-naranja corresponden a valores de adecuación entre 0,17 y 0,61 reflejando un IP bajo y el impacto ambiental potencial sobre los cursos de agua y humedales, estos últimos también siguen un patrón que coincide con áreas aledañas a los cursos fluviales. Las zonas de color amarillo representan valores en un rango de entre 0,62 y 0,79 mostrando áreas de transición entre la mayor y menor aptitud. Por último, las zonas de color verde corresponden a valores de adecuación entre 0,8 y 1 reflejando valores de IP de entre 64 y 77, un bajo impacto ambiental sobre los cursos de agua y humedales, y presentando condiciones socioeconómicas más favorables.

**Figura 4.** Mapa de adecuación continuo sobre el uso potencial agrícola en la cuenca media del río Luján.



Fuente: Elaboración propia mediante el software TerrSet versión 18.31. (ClarkUniversity, 2017) y el software QGIS versión 3.26.3-Buenos Aires (QGIS Development Team, 2022).

En el resultado final (Figura 5 y Tabla 5), se observan las zonas y superficies con potencial aptitud agrícola. El mapa final fue reclasificado en 5 categorías en función del nivel de adecuación para uso potencial agrícola (Tabla 4). Para su interpretación se toman en consideración a modo orientativo las definiciones propuestas en el Esquema de la FAO (FAO, 1976).

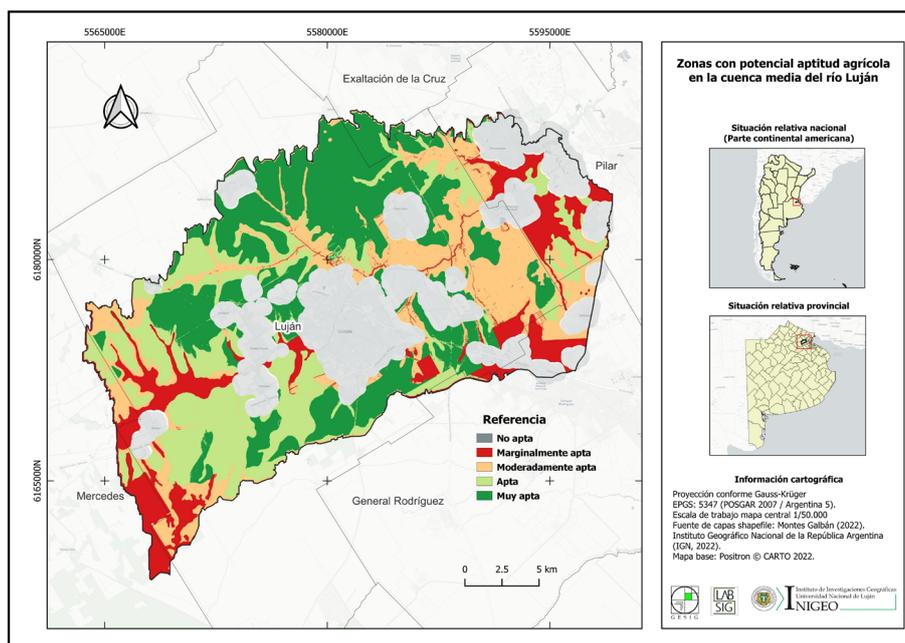
Las zonas 'No aptas' corresponden a las áreas con prohibición de aplicación de productos agroquímicos y/o plaguicidas con destino al uso agropecuario en las áreas urbanas, definida como un perímetro alrededor de los centros poblados principales, dentro de los cuales destaca la ciudad de Luján en el centro del área de estudio. En este caso, se trataría de áreas 'No apta permanentemente' por tener limitaciones graves de tipo físico (cobertura urbana), que son insalvables a largo plazo.

La siguiente clase, en orden creciente, está representada por las zonas 'Marginalmente aptas', representa un 15% de la superficie y se localiza principalmente a las márgenes del río Luján y de sus afluentes, en estas zonas las limitaciones para el uso sostenido serían delicadas, de acuerdo a un balance costos - beneficios, su utilización solo se justificaría para un uso de forma marginal.

Las zonas 'Moderadamente aptas', representan el 24% de la superficie de las zonas con aptitud agrícola, las mayores áreas se localizan al este de la cuenca, esta clase presentaría limitaciones moderadamente graves, reduciendo los beneficios a la vez que implicaría riesgos de degradación en el empleo sostenido del suelo.

Por último, las zonas con las condiciones de aptitud más favorables (Apta y Muy apta), representarían más del 60% de la superficie total, localizándose en dos franjas bien definidas en el margen norte y sur del río Luján. Esta categoría no tendría limitaciones para el uso sostenido o limitaciones de menor cuantía que no afectan la productividad ni aumentan considerablemente los costos.

**Figura 5.** Mapa de zonas con potencial aptitud agrícola en la cuenca media del río Luján.



Fuente: Elaboración propia mediante el software TerrSet versión 18.31. (Clark University, 2017) y el software QGIS versión 3.26.3-Buenos Aires (QGIS Development Team, 2022).

**Tabla 5.** Superficie de las clases con aptitud agrícola.

Clases	Superficie en ha	Superficie en %
Marginalmente apta	6.751,8	15
Moderadamente apta	11.021,59	24
Apta	12.102,73	27
Muy apta	15.341,56	34
Total	45.217,68	100

Fuente: Elaboración propia.

## 6. Consideraciones finales

Puede concluirse que el mapa de zonas con potencial aptitud agrícola obtenido mediante análisis de EMC y los SIG, es un producto informativo que brinda una alternativa adecuada desde la consideración de múltiples criterios, permitiendo alcanzar un resultado con mayor equilibrio entre los factores ambientales, económicos y sociales. El resultado principal brinda una zonificación del uso potencial agrícola representada en cinco clases de aptitud (Muy apta, Apta, Moderadamente apta, Marginalmente apta y No apta). Destacando con un 60% de la superficie total estudiada las zonas con condiciones de aptitud más favorables (Apta y Muy apta). En base a la escala de trabajo (aproximadamente 1/50.000) el modelo resultante se circunscribe dentro de los estudios de tipo semidetallados, a partir del cual será posible evaluar la viabilidad de alternativas de intervención, la implementación de programas de desarrollo, así como planes de conservación de suelos.

Por otra parte, se contempla en próximas instancias de investigación realizar una verificación de campo y una comprobación espacial del modelo. Esto último posibilitará avanzar en futuras fases de investigación con el objetivo de contrastar la distribución espacial del uso potencial agrícola con el uso actual del territorio.

Finalmente, la metodología constituye un aporte de los estudios geográficos para soportar la toma de decisiones y conducir las acciones en el territorio de acuerdo con su aptitud potencial, representa una herramienta estratégica para ordenar el territorio en el marco de las cuencas hidrográficas y, enfrentar el desafío de incrementar la productividad de las actividades agrícolas de forma sustentable y con mínima degradación de los recursos naturales.

## Agradecimientos

Este estudio se ha llevado a cabo en el marco del proyecto de investigación titulado 'Modelado espacial para la optimización del uso agrícola del suelo mediante la aplicación de Sistemas de Información Geográfica. Cuenca media del río Luján (Provincia de Buenos Aires, Argentina)'. Aprobado por Resolución REC N° 224/19. Financiado por la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Luján (2019-2023).

## Referencias bibliográficas

- Aguilar Rivera, N., Galindo Mendoza, G., Fortanelli Martínez, J. & Contreras Servin, C. (2010). Evaluación multicriterio y aptitud agroclimática del cultivo de caña de azúcar en la región de Huasteca (México). *Revista Corpoica – Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 11(2), 144-154.
- Bunge, M. (2014). *Memorias. Entre dos mundos*. Eudeba.
- Buzai, G. D. (2011). Determinación de zonas de potencial conflicto entre usos del suelo en el Partido de Luján, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *I Jornadas de Investigación del Programa de Estudios Geográficos*, Luján, Argentina.
- Buzai, G. D. (2018a). Crecimiento urbano y potenciales conflictos entre usos del suelo en el municipio de Luján (Provincia de Buenos Aires, Argentina). Modelado espacial 2016-2030. *Cuadernos Geográficos*, 57(1), 155-176. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v57i1.5656>
- Buzai, G. D. (2018b). Geografía Global: La dimensión espacial en la ciencia y en la sociedad. *Anales de la Sociedad Científica Argentina*, 263(3), 9-26. [https://www.researchgate.net/publication/328466196\\_Geografia\\_Global\\_la\\_dimension\\_espacial\\_en\\_la\\_ciencia\\_y\\_la\\_sociedad](https://www.researchgate.net/publication/328466196_Geografia_Global_la_dimension_espacial_en_la_ciencia_y_la_sociedad)
- Buzai, G. D. & Baxendale, C. A. (2011). *Análisis socioespacial con sistemas de información geográfica. Perspectiva científica. Temáticas de base ráster* (Vol. 1). Lugar Editorial.
- Buzai, G. & Principi, N. (2017). Identificación de áreas de potencial conflicto entre usos del suelo en la cuenca del Río Luján, Argentina. *Revista Geográfica De América Central*, 3(59), 91 - 124. <https://doi.org/10.15359/rgac.3-59.4>
- Cabrera, A. L. (1976). *Regiones fitogeográficas argentinas. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería* (Vol. 2). Acme.
- Carver, S. J. (1991). Integrating Multi-Criteria Evaluation with Geographical Information Systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, 5(3), 321-339.
- Clark University. (2017). *TerrSet. Versión 18.31*. Massachusetts: Clark Labs.
- Department of Agriculture de EE. UU. (1965). *Soil Survey Manual* (Sección de Conservación de Suelos y Aguas del Ministerio de Agricultura y Cría de Venezuela, Trad.). Ministerio de Agricultura y Cría de Venezuela.
- Eastman, R. J. (2012). *Idrisi selva. Guía para SIG y procesamiento de imágenes*. Clark University.
- Espejel García, A., Romero Domínguez, J., Barrera Rodríguez, A., Torres Espejel, B. & Félix Crescencio, J. (2015). Determinación del uso potencial agrícola mediante modelación geoespacial y análisis multicriterio para la cuenca Balsas Mezcala. *Revista Ra Ximhai*, 11(5), 77-95.
- Gómez Delgado, M. & Barredo Cano, J. (2005). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Ra-Ma.
- Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina. (2021). *Modelos Digitales de Elevaciones de la Argentina*. <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Introduccion>

- Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina. (2022). *Capas SIG*. <https://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. (12 de mayo 2022a). *Cartas de Suelos República Argentina - Provincia de Buenos Aires (1.0)* [Conjunto de datos]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6353509>
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. (2022b). Distribución de humedales y cuerpos de agua profunda en la República Argentina (versión 1.0). *Google Earth Engine Apps*. <https://intahumedales.users.earthengine.app/view/mapahumedalesargentina>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina. (2015a). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010 (cuestionario básico)* [Base de Datos Redatam +Sp]. <https://redatam.indec.gov.ar/argbin/RpWebEngine.exe/PortalAction?&MODE=MAIN&BASE=CPV2010B&MAIN=WebServerMain.inl&ga=2.124460620.799534294.1617970322-1484984679.1617970322>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina. (2015b). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010 (cuestionario ampliado)* [Base de Datos Redatam +Sp]. <https://redatam.indec.gov.ar/argbin/RpWebEngine.exe/PortalAction?&MODE=MAIN&BASE=CPV2010A&MAIN=WebServerMain.inl&ga=2.142941117.90339686.1620242123-1899184022.1620242123>
- Irizar, A. B. & Andriulo, A. E. (2017). Ecorregión Pampeana. Norte de Buenos Aires. En M. G. Wilson, *Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina* (pp. 249-251). Ediciones INTA.
- Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. Wiley.
- Montes Galbán, E. (2019). Tecnologías de la Información Geográfica y producción de material didáctico para la enseñanza de los recursos naturales: Diagnóstico territorial de la cuenca media del río Luján [Sesión de conferencia]. *XII Jornadas de Educación de Percepción Remota en el Ámbito del Mercosur*, Buenos Aires, Argentina.
- Montes Galbán, E. (marzo 2020). Cuenca media del río Luján: Diagnóstico territorial de sus recursos naturales [Mapa]. *Colección Cartográfica del GESIG*. <https://gesiginigeo.wixsite.com/col-cartografica/n%C2%BA1>
- Montes Galbán, E. (2022). Análisis morfométrico de una cuenca mediante la aplicación de Sistemas de Información Geográfica. Cuenca media del río Luján, Argentina [Sesión de conferencia]. *VI Congreso Internacional de Ordenamiento Territorial y Tecnologías de la Información Geográfica*, Buenos Aires, Argentina.
- Ordenanza N° 5953 de 2011 [Municipalidad de Luján]. Por la cual se establecen los parámetros y procedimientos sobre utilización de los agroquímicos. 14 de julio de 2011.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1976). Esquema para la evaluación de tierras. *Boletín de suelos de la FAO*, (32).
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1997). Zonificación agroecológica. Guía general. *Boletín de suelos de la FAO*, (73).
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2009). *Guía para la descripción de suelos*. División de Información FAO, Roma.
- Pereyra, F. X. & Ragas, D. B. (2021). *Los suelos de la pampa ondulada. Características, clasificación, distribución y génesis. Provincia de Buenos Aires. Argentina*. Instituto de Geología y Recursos Minerales. SEGEMAR.
- Pérez, Y., Cadiach, O., Passuello, A. & Schuhmacher, M. (2010). Propuesta de un modelo de evaluación multicriterio para la incorporación de lodos de depuradora en suelos agrícolas. *GeoFocus, International Review of Geographical Information Science and Technology*, (10), 208–231. <https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/198>
- Principi, N. C. (2017). Avances para la obtención del mapa de aptitud agrícola en la cuenca del río Luján con evaluación multicriterio. *Red Sociales, Revista del Departamento de Ciencias Sociales*, 04(5), 157-167.
- QGIS Development Team. (1 de agosto de 2022). *QGIS. Un Sistema de Información Geográfica libre y de Código Abierto*. <https://qgis.org/es/site/>
- Riquier, J., Bramao, L. & Cornet, S. P. (1970). *A new system of soil appraisal in terms of actual and potential productivity*. FAO Soil Resources, Development and Conservation Service.

- Santé, I. & Crecente, R. (2005). Evaluación de métodos para la obtención de mapas continuos de aptitud para usos agroforestales. *GeoFocus. International Review of Geographical Information Science and Technology*, (5), 40–68. <https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/58>
- Sobral, R. E. & Nakama, V. (12 - 16 de septiembre 1988). Índices de productividad, método paramétrico para evaluación de tierras [Sesión de conferencia]. *Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo XII*, Corrientes, Argentina.
- Voogd, H. (1983). *Multicriteria Evaluation for urban and regional planning*. Pion, Ltd.
- Watler, W. (2017). *Clasificación de las Tierras por capacidad de uso, considerando a la cuenca hidrográfica como la unidad de planificación territorial*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza - CATIE. [https://www.researchgate.net/publication/348631338\\_Clasificacion\\_de\\_las\\_Tierras\\_por\\_Capacidad\\_de\\_Uso\\_Considerando\\_a\\_la\\_Cuenca\\_Hidrografica\\_como\\_la\\_Unidad\\_de\\_Planificacion\\_Territorial](https://www.researchgate.net/publication/348631338_Clasificacion_de_las_Tierras_por_Capacidad_de_Uso_Considerando_a_la_Cuenca_Hidrografica_como_la_Unidad_de_Planificacion_Territorial)
- Young, A. & Dent, D. (1995). *Soil survey and land evaluation*. E. FN SPON.
- Zanaga, D., Van De Kerchove, R., De Keersmaecker, W., Souverijns, N., Brockmann, C., Quast, R., Wevers, J., Grosu, A., Paccini, A., Vergnaud, S., Cartus, O., Santoro, M., Fritz, S., Georgieva, I., Lesiv, M., Carter, S., Herold, M., Li, L., Tsendbazar, N. E. & Arino, O. (2021). ESA WorldCover 10 m 2020 v100. ZENODO. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5571936>