

**Universidad Nacional de Cuyo**

**Facultad de Ciencias Agrarias**



**“EVALUACIÓN ESPACIAL DE LA  
FUNCIÓN ECOSISTÉMICA PROTECCIÓN  
DE ACUÍFEROS POR COBERTURA  
VEGETAL (PAC), EN LA CUENCA NORTE  
DE LA PROVINCIA DE MENDOZA”**

**2019**

**Tesis de grado**

**Ingeniería en Recursos Naturales Renovables**

**Autora:**

**Consuelo Mercedes Fariello**

B°Portal de Boedo, Luján de Cuyo, Mendoza.

[Consufariello@gmail.com](mailto:Consufariello@gmail.com)

Tel. cel. + 54 9 261 593-3156

**Director:**

**Leandro Mastrantonio**

## SUMMARY

Society's demand for health and environmental care is increasing, requiring the taking of preventive measures against potential negative impacts produced by agricultural practices, including the contamination of natural resources by the use of agrochemicals. The objective of this work was to evaluate the spatial distribution of the vulnerability of aquifers and the level of protection that the vegetation cover provides to them in the North basin of Mendoza. To this end, the ecosystem function of Aquifer Protection by Coverage (PAC), included in the ECOSER protocol, was analyzed. It covers the DRASTIC index, which is based on the application of seven hydrogeological parameters to determine vulnerability. A great spatial variability of both functions was obtained on the extension of the basin. Regarding the PAC function, the greatest protection by the vegetation was found over the area where the type of cover is Native. On the contrary, the less protection by the vegetal cover, was located entirely within the Agroecosystem, being then the use of the soil the determining factor of the greater or lesser functional capacity of the ecosystem. On the other hand, the areas of greatest vulnerability in the confined aquifer area are explained taking into account the depth of the aquifer and the hydraulic conductivity factor; while in the free aquifer area, the most influential parameters are the Nature of the unsaturated zone and the Aquifer Recharge. The sectors with less vulnerability are defined by the Nature of the Unsaturated Zone parameter. The information generated constitutes a basis for environmental management, land use planning and the development of good agricultural practices.

## RESUMEN

La demanda de la sociedad respecto al cuidado de la salud y del ambiente es cada vez mayor, requiriendo la toma de medidas de prevención contra potenciales impactos negativos producidos por las prácticas agropecuarias, entre ellos la contaminación de los recursos naturales por el uso de agroquímicos. El objetivo de este trabajo fue evaluar la distribución espacial de la vulnerabilidad de acuíferos y el nivel de protección que la cobertura vegetal le proporciona a los mismos en la cuenca Norte de Mendoza. Para tal fin se analizó la función ecosistémica de Protección de Acuíferos por Cobertura (PAC), comprendida en el protocolo ECOSER. La misma abarca el índice DRASTIC, que se basa en la aplicación de siete parámetros hidrogeológicos en la determinación de la vulnerabilidad. Se obtuvo una gran variabilidad espacial de ambas funciones sobre la extensión de la cuenca. En cuanto a la función PAC, la mayor protección por parte de la vegetación se encontró sobre la zona donde el tipo de cobertura es Nativa. Por el contrario, la menor protección por parte de la cobertura vegetal, se localizó en su totalidad dentro del Agroecosistema, siendo entonces el uso de suelo el factor determinante de la mayor o menor capacidad funcional del ecosistema. Por otro lado, las zonas de mayor vulnerabilidad en la zona de acuífero confinado, se explican teniendo en cuenta la Profundidad del acuífero y el factor de Conductividad hidráulica; mientras que en el área de acuífero libre, los parámetros de mayor influencia son el de Naturaleza de la zona no saturada y el de Recarga del acuífero. Los sectores con menor vulnerabilidad están definidos por el parámetro Naturaleza de la Zona no Saturada. La información generada constituye una base para la gestión ambiental, el ordenamiento territorial y el desarrollo de buenas prácticas agropecuarias.

**Palabras clave:** función ecosistémica, vulnerabilidad de acuíferos, ordenamiento territorial.

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	6
1.1 FUNDAMENTACIÓN	6
1.2. OBJETIVOS	7
1.3 HIPÓTESIS	8
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1. SERVICIOS Y FUNCIONES ECOSISTÉMICAS	8
2.1.1 MARCO DE ANTECEDENTES	11
2.1.1.1 ECOSER, UNA HERRAMIENTA INTEGRAL	13
2.1.2 FUNCIÓN ECOSISTÉMICA “PROTECCIÓN DE ACUÍFEROS POR COBERTURA VEGETAL”	16
2.1.3.1 Índice DRASTIC	18
2.2 MÉTODO GEOESTADÍSTICO “KRIGING”	20
3. MATERIALES Y MÉTODOS	21
3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	21
3.1.1 Ubicación y extensión	21
3.1.2 Características climatológicas	23
3.1.3 Aspectos hidrogeológicos	23
3.1.4 Descripción socio-económica	24
3.2 METODOLOGÍA	25
4. RESULTADOS	32
4.1 RESULTADOS PARCIALES PARA EL CÁLCULO DE LA RECARGA NETA.	32
4.2. RESULTADOS FINALES	36
4.2.1. Mapas de los Parámetros que conforman el Índice DRASTIC	36
4.2.1.1. Profundidad del acuífero (D)	36
4.2.1.2. Recarga Neta (R)	38
4.2.1.3 Litología del Acuífero (A)	40
4.2.1.4 Naturaleza del Suelo (S)	42
4.2.1.5 Pendiente de la Superficie (T)	43
4.2.1.6. Naturaleza de la Zona No Saturada (I)	44
4.2.1.7. Conductividad Hidráulica del Acuífero (C):	47
4.2.2. Índice DRASTIC	48
4.2.3. Identificación de los Tipos de Ecosistemas Dominantes (TED)	49
	4

4.2.4. Nivel de insumos necesarios (Pi)	50
4.2.5. Función Ecosistémica: Protección de Acuíferos por Cobertura	52
5. CONCLUSIONES FINALES	55
BIBLIOGRAFÍA	58

# 1. INTRODUCCIÓN

La demanda de la sociedad respecto al cuidado de la salud y del ambiente es cada vez mayor, requiriendo la toma de medidas de prevención contra potenciales impactos negativos producidos por las prácticas agropecuarias, entre ellos la contaminación de los recursos naturales por el uso de agroquímicos.

## 1.1 FUNDAMENTACIÓN

En la provincia de Mendoza, el desarrollo económico se debe esencialmente al aprovechamiento integral del recurso hídrico. El agua es un bien estratégico, porque la agricultura desempeña un papel destacado y la única oportunidad de practicarla es bajo riego. Las características de aridez, las cuencas irrigadas, los bajos volúmenes de precipitaciones, los escasos caudales y un alto índice de evapotranspiración, han dado lugar a un pronunciado déficit hídrico. Las aguas subterráneas actúan como reservorio, cumpliendo la función primordial de aporte durante los años hidrológicos pobres; sin embargo, la agricultura y su acelerado crecimiento durante los últimos 30 años, han incrementado los contaminantes de origen agrícola en las mismas (Keeney 1986; Melian et al., 1999; Rodven y Simpkins, 2001) provocando un progresivo deterioro de su calidad.

En tal sentido, para establecer una administración de los recursos hídricos ambientalmente segura en la provincia, la mejor práctica es proteger este recurso contra la contaminación, ya que la descontaminación es un proceso largo y costoso, y en algunos casos llega a ser irreversible (Ljubow et al., 2003). El agua, como principal soporte de las actividades humanas y los procesos ecosistémicos, debe ser considerada como el eje de la gestión ambiental y enlace integrador del estudio de las relaciones entre los sistemas naturales y sociales que dan lugar a la configuración del territorio (Betancur et al., 2013).

Es por ello que un **mapa de vulnerabilidad**, basado en las características naturales del terreno, no sólo permitiría adoptar las medidas de protección del acuífero de contaminantes que pueden infiltrarse desde la superficie, sino que también contribuiría a realizar una ocupación del suelo

ambientalmente responsable; lo que significa establecer una actividad humana en función de la capacidad que el medio posee para atenuar la carga contaminante que la misma genera. Esta es una forma de lograr realmente la convergencia de desarrollo humano y medio ambiental, en lo que se ha denominado desarrollo sustentable o sostenible (Ljubow et al., 2003).

Otro modelo importante a cuantificar, que engloba el modelo anterior, es la **función ecosistémica**<sup>1</sup> de **Protección de Acuíferos por Cobertura (PAC)**. Entre sus múltiples roles, la vegetación natural resguarda la calidad de los reservorios de agua subterránea frente a su eventual contaminación por agrotóxicos en caso de ser reemplazados por cultivos agrícolas (Laterra et al., 2011). Este papel que cumple la vegetación toma más relevancia en las zonas más vulnerables del acuífero y es por esto que, el mapeo de ambas variables está íntimamente relacionado.

La cuantificación explícita y el mapeo de servicios y funciones ecosistémicas proveen una base valiosa para cambiar las preferencias de la sociedad en cuanto a su conservación y manejo. A su vez, la evaluación de las funciones ecosistémicas sirve de instrumento para transmitir a los actores claves en la toma de decisiones la importancia de los ecosistemas y de las funciones que soportan el flujo de servicios ecosistémicos<sup>2</sup>, los cuales contribuyen al bienestar de las sociedades (Costanza et al. 1997, de Groot et al. 2002, Daily et al. 2009). Bajo este contexto, la distribución espacial de la función ecosistémica PAC, toma especial importancia para ser incluida en el marco de procesos de **ordenamiento territorial**, ante la amenaza existente en cuanto a la contaminación de acuíferos por agroquímicos, efluentes cloacales o industriales.

---

<sup>1</sup> **Funciones ecosistémicas:** procesos biológicos, geoquímicos y físicos que tienen lugar en un ecosistema y producen un servicio (modificado de Maynard et al., 2010).

<sup>2</sup> **Servicios ecosistémicos:** Componentes y procesos de los ecosistemas que son consumidos, disfrutados o que conducen a aumentar el bienestar humano tomando en cuenta la demanda de los beneficiarios, así como la dinámica de los ecosistemas (Daily 1997, Boyd y Banzhaf 2007, Quétier et al. 2007, Luck et al. 2009, Quijas et al. 2010)

## **1.2. OBJETIVOS**

### **Objetivo general:**

Evaluar la distribución espacial de la vulnerabilidad de acuíferos y el nivel de protección que la cobertura vegetal le proporciona a los mismos en la cuenca Norte de Mendoza.

### **Objetivos particulares:**

- Determinar la distribución espacial de tipos de ecosistemas dominantes (TED) en la cuenca de estudio, necesario para el cálculo de la función ecosistémica de protección de acuíferos por cobertura (PAC).
- Determinar las zonas con mayor y menor vulnerabilidad en la zona de estudio, definidas a partir del índice DRASTIC.
- Determinar las zonas con mayor y menor protección por parte de la cobertura vegetal, definidas a partir de la función PAC.

## **1.3. HIPÓTESIS**

En este trabajo se plantea la hipótesis de que la vulnerabilidad de acuíferos subterráneos y su protección por parte de la cobertura vegetal varían espacialmente en la cuenca Norte de Mendoza.

# **2. MARCO TEÓRICO**

## **2.1. SERVICIOS Y FUNCIONES ECOSISTÉMICAS**

Los servicios ecosistémicos (SE) se definen como los componentes y procesos de los

ecosistemas que son consumidos, disfrutados o que conducen a aumentar el bienestar humano tomando en cuenta la demanda de los beneficiarios, así como la dinámica de los ecosistemas (Daily, 1997; Boyd y Banzhaf, 2007; Quétier et al., 2007; Luck et al., 2009; Quijas et al., 2010). Servicios tales como la alimentación y el suministro de bioenergía, la regulación del clima y las comodidades del paisaje que se generan en las zonas terrestres cultivadas y naturales, son esenciales para el bienestar de la humanidad (MEA, 2005).

La creación de este término trasciende la necesidad de conservar la naturaleza y su biodiversidad por sí mismas (Daily, 1997; MEA, 2003), ya que sugiere una alternativa para mostrar que la conservación de los ecosistemas no es sólo una aspiración ética de la sociedad, sino también una necesidad estrechamente ligada a la satisfacción de las necesidades básicas de la vida humana. La idea principal aquí es que el concepto de los bienes y servicios de los ecosistemas es inherentemente antropocéntrico: es la presencia de seres humanos como agentes de valoración lo que permite la traducción de estructuras ecológicas básicas y procesos en entidades cargadas de valor (Rosas, 2016).

La producción de SE depende de la estructura y los procesos dentro de los ecosistemas (MEA, 2003). El Millenium Ecosystem Assessment (MEA, 2005) define a los servicios ecológicos como “El producto de las funciones de los ecosistemas que benefician a los seres humanos”. Las **funciones ecosistémicas** (FE) son entonces un subconjunto de las interacciones entre los procesos y estructuras ecosistémicas que sustentan la capacidad de un ecosistema para proveer bienes y servicios (De Groot, R., Fisher, B., y Christie, M., 2010)

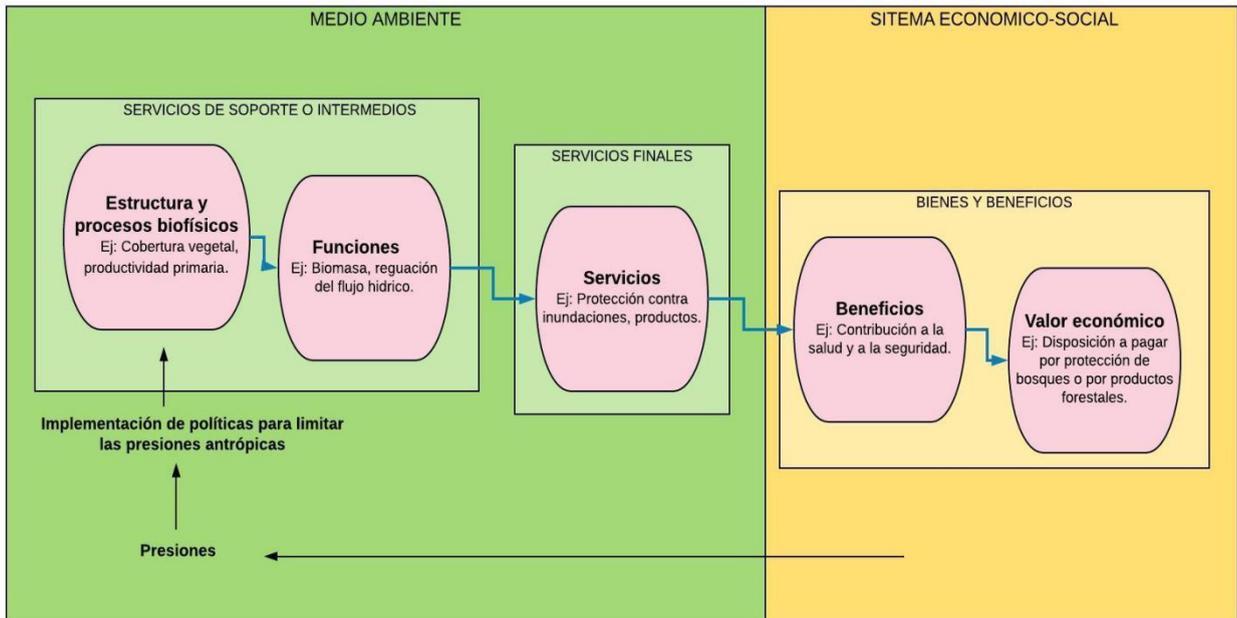
La diferencia entre función (e.j., productividad primaria) y servicio (e.j., rendimiento cosechable) hace que un servicio ecosistémico pueda ser producto de dos o más funciones ecosistémicas, mientras que en otros casos una sola función ecosistémica (i.e., proceso físico, químico o biológico que contribuye al mantenimiento de un ecosistema) contribuye a dos o más servicios ecosistémicos (Turner et al., 2003).

En base a la clasificación propuesta por Maynard et al. (2010), las FE pueden ser agrupadas según tres categorías:

- Regulación: procesos que permiten el mantenimiento de las condiciones ecológicas necesarias para el desarrollo de las actividades humanas;
- Soporte: procesos que permiten la existencia de condiciones apropiadas para el desarrollo de poblaciones de especies de fauna y flora;
- Provisión: procesos que permiten producir o acumular recursos naturales.

Algunos de los procesos ecosistémicos más importantes que podemos mencionar son: la transformación de energía, principalmente de radiación solar en biomasa (productividad primaria); almacenamiento y transferencia de minerales y energía en las cadenas alimentarias (productividad secundaria); ciclos biogeoquímicos; mineralización de la materia orgánica en los suelos y sedimentos; y la regulación del sistema climático-físico. Una vez que las funciones de un ecosistema son conocidas, la naturaleza y la magnitud del valor puede ser analizado y evaluado a través de los bienes y servicios proporcionados por las funciones del ecosistema (De Groot, 2002).

Uno de los enfoques considerado en este trabajo a partir del cual se puede entender a los servicios ecosistémicos es el de la “Cascada de los Servicios Ecosistémicos” (CSE). La CSE conecta lógica y sucintamente las estructuras y procesos ecosistémicos con los elementos que afectan el bienestar humano a través de una especie de “cadena de producción” (Figura 1). De esta manera, la CSE demuestra que se requieren estructuras funcionales de un ecosistema para la generación de servicios ecosistémicos y de los consiguientes beneficios asociados a ellos (Haines-Young y Potschin, 2010). En otras palabras, la CSE revela que para obtener un flujo continuo de SE se requiere proteger y conservar los ecosistemas y la biodiversidad que les dan sustento.



**Figura 1:** Cascada de los Servicios Ecosistémicos. Fuente: Haines-Young y Potschin (2010)

Un aspecto clave en la evaluación de los SE es cuantificar en qué medida un proceso determinado como el rendimiento hidrológico, el grado de apertura del ciclo del N y el balance de C, entre otros, se ve afectado por diferentes tipos de intervenciones antrópicas, entre las que se pueden destacar la implantación de bosques artificiales, construcción de carreteras y expansión agrícola; además de cómo se reparten los beneficios económicos y ambientales entre los distintos actores socioeconómicos (Paruelo, 2010). El caso más llamativo es el de la agricultura donde se produce la manipulación de una parte de los ecosistemas terrestres para maximizar los rendimientos de ciertas especies en detrimento de otras. Esta práctica implica la modificación deliberada de un conjunto de estructuras y procesos ecosistémicos a múltiples escalas espaciales y temporales, lo que a su vez afecta al resto de las estructuras y procesos en diversas escalas provocando alteraciones de los patrones de organización en intensidad y dirección variable, que pueden dar lugar incluso a variaciones significativas de la “ventana de viabilidad” de los sistemas objeto de intervención (Ulanowicz, 1997).

## 2.1.1 MARCO DE ANTECEDENTES

El concepto de “servicios” ofrecidos por los ecosistemas hacia las poblaciones humanas surge a consecuencia del movimiento ambientalista de finales de los años 60 (Mooney y Ehrlich, 1987). En esta época se hace patente la crisis ambiental y se inician cuestionamientos acerca de los impactos severos en la capacidad del planeta para mantenerse y producir suficientes bienes para ser consumidos por las poblaciones humanas. Junto con una lista de los problemas ambientales más severos surge la primera relación de servicios ecosistémicos que se proveen a las sociedades en un esfuerzo por comunicar a los tomadores de decisiones y al público en general acerca del estrecho vínculo entre el bienestar humano y el mantenimiento de las funciones básicas del planeta (Balvanera y Cotler, 2007).

El interés por entender los servicios ecosistémicos y el desarrollo de mecanismos que aseguren su mantenimiento se ha incrementado muy rápidamente durante los últimos 20 años.

A lo largo de este desarrollo, algunos trabajos han sido particularmente importantes para el entendimiento de los servicios y para la definición de los rumbos futuros de la investigación en el tema. El libro compilado por Daily (1997) sobre los servicios ambientales y de las sociedades humanas es hoy un clásico. En él se definen los servicios, se hace una breve historia de su desarrollo, se reseñan los servicios que proveen diferentes biomas (e.g. bosques) o distintos componentes de los ecosistemas (e.g. suelo, polinizadores), y se presenta además una reflexión sobre la evaluación económica de los servicios ambientales (Balvanera y Cotler, 2007).

En el mismo año se publicó un artículo por múltiples autores, coordinado por Costanza (1997), que ha tenido un profundo impacto sobre los medios académicos y de tomadores de decisiones. En él se enfatiza el papel que juegan los ecosistemas en el mantenimiento de los sistemas de soporte de la vida en el planeta y su relación directa o indirecta con el bienestar humano. Ellos calculan el valor económico de 17 servicios que son proveídos por 16 biomas en un total de 33 billones de dólares por año, lo cual es el doble del producto bruto global del planeta. Aunque pueden existir fuentes de error e incertidumbre en estos cálculos, y si bien no todos los beneficios que los humanos obtenemos de los ecosistemas pueden ser valorados económicamente, este

artículo permite comunicar un mensaje muy contundente a los tomadores de decisiones y a la sociedad en general (Balvanera y Cotler, 2007).

Al año siguiente se publicó un artículo de Kearns et al (1998) que puso énfasis en la interacción entre los polinizadores y las plantas. Este es un artículo que explora las consecuencias de la fragmentación del hábitat y del manejo agropecuario sobre las poblaciones de polinizadores y su diversidad, y sus impactos negativos sobre la polinización de las múltiples plantas silvestres y en particular sobre la actividad agrícola (Balvanera y Cotler, 2007).

Posteriormente, en el año 2000 arrancó una iniciativa que duraría cinco años y que aglutinará los esfuerzos de cerca de 2.000 científicos y tomadores de decisiones pertenecientes a 85 países y que se denominó la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (Millennium Ecosystem Assessment). Sus resultados sirven actualmente para el desarrollo de muchas investigaciones sobre servicios ecosistémicos y se espera que también ejerzan un impacto importante en el diseño de políticas públicas. Su objetivo central fue ofrecerle a los tomadores de decisiones, en los gobiernos de los países y en las convenciones internacionales (e.j. biodiversidad, desertificación), una síntesis de la información disponible a la fecha sobre la estrecha relación entre los ecosistemas y el bienestar humano. Para lograrlo, se elaboró un marco conceptual general que incluye, entre otros aspectos, la definición del concepto de servicios y una tipología de estos últimos, y un esquema conceptual que permite relacionar aspectos socio-económicos de las sociedades con el tipo de manejo de los ecosistemas, los servicios que proveen y los distintos componentes del bienestar humano (MEA, 2003). Este documento también sugiere procedimientos analíticos para el estudio de los servicios ecosistémicos. Para el 2005 se publicaron los resultados que emergen de esta iniciativa en el formato de resúmenes síntesis para tomadores de decisiones (MEA, 2005) y de libros in extenso (Carpenter et al., 2006; Chopra et al., 2005; Hassan et al., 2005). Estos últimos abarcan un diagnóstico de la situación actual (Hassan et al., 2005), el contraste de escenarios futuros sobre la provisión de distintos servicios y distintos aspectos del bienestar humano (Carpenter et al., 2006), así como una evaluación de las estrategias más exitosas para el mantenimiento de los distintos servicios (Chopra et al., 2005).

### **2.1.1.1 ECOSER, UNA HERRAMIENTA INTEGRAL**

A partir de las grandes transformaciones de los paisajes rurales de nuestro país en las últimas dos décadas, el protocolo ECOSER surge en el INTA ante la necesidad de contar con herramientas cuantitativas y objetivas para evaluar la provisión de SE. En la cartera de proyectos que inició en 2006, dentro del hoy desaparecido Programa Nacional de Ecorregiones, se destacó el proyecto “Valorización de los bienes y servicios ambientales para caracterizar vulnerabilidad en áreas ecológicas críticas”. El mismo tenía como objetivo evaluar la vulnerabilidad ambiental de áreas ecológicas críticas, con el fin de apoyar la aplicación de estrategias de ordenamiento territorial, y sirvió de marco para el desarrollo de distintas propuestas de evaluación y mapeo de SE, incluyendo las primeras versiones de esta herramienta (Latterra et al., 2015).

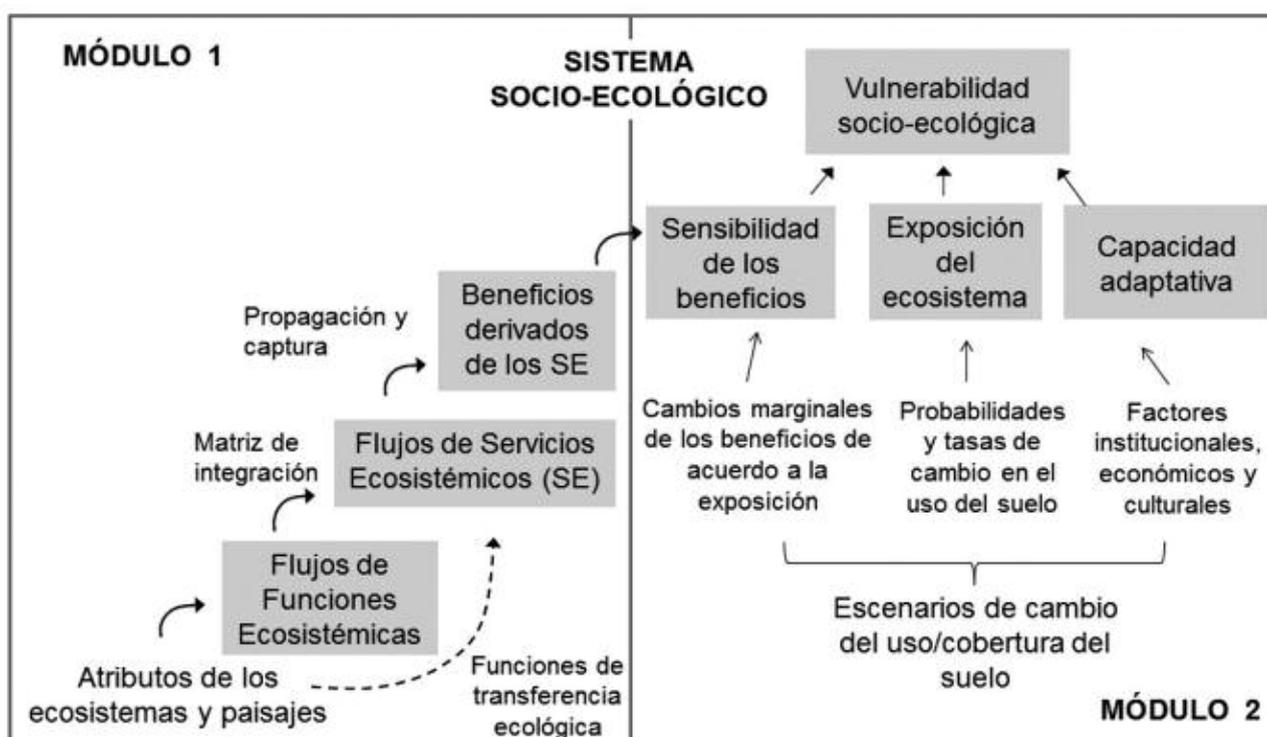
Posteriormente, en el Área Estratégica de Gestión Ambiental, el tema fue canalizado en un proyecto sobre “Evaluación y modelación de bienes y servicios ecosistémicos frente a la agriculturización del paisaje”. Con definiciones claras y más conocimientos básicos sobre las espaldas, el objetivo del INTA fue desarrollar protocolos y herramientas estandarizados para poder estudiar los SE, con el fin de alejarse definitivamente de valoraciones cualitativas y/o subjetivas (Latterra et al., 2015).

El protocolo ECOSER es un esquema de procedimientos para la evaluación no monetaria y el modelado de la distribución espacial de servicios ecosistémicos y de la vulnerabilidad ambiental asociada a la pérdida de los mismos, aplicable a un amplio rango de escalas espaciales y calidad de información. Entre las características distintivas de tales procedimientos, se destacan: a) la estimación indirecta de la provisión relativa de SE a través del flujo de las funciones que los soportan en cada tipo de ecosistema, b) el ajuste de esas funciones a las condiciones particulares de cada sitio y de su contexto espacial, y c) la integración entre métodos de evaluación biofísica y métodos de valoración social y/o económica (Latterra et al., 2015).

Es una herramienta que está orientada tanto al soporte de la toma de decisiones sobre uso del suelo, como a la investigación e integración disciplinaria y colaboración científica entorno a los “flujos de funciones (FE) y servicios ecosistémicos (SE)”, su interacción y su “captura por la

sociedad”<sup>3</sup>, así como la “vulnerabilidad socio-ecológica (VSE)”<sup>4</sup> bajo distintos escenarios de pérdida de SE (Latterra et al., 2015).

Este protocolo se compone de dos etapas o módulos (Figura 2): 1) la evaluación y mapeo funcional del paisaje donde el producto generado son los mapas de FE, diferentes SE y sus beneficios asociados; 2) la evaluación de la VSE frente a la pérdida de beneficios derivados de los SE.



**Figura 2:** Diagrama de flujos del protocolo ECOSER para la evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos (SE) y estimación de la vulnerabilidad socio-ecológica (VSE) a la pérdida de los

<sup>3</sup> **Captura de SE:** el flujo de SE efectivamente utilizado para el beneficio de individuos, grupos sociales o la sociedad en su conjunto. El proceso de captura normalmente exige la intervención de capital social y económico (Latterra et al., 2015).

<sup>4</sup> **Vulnerabilidad socio-ecológica (VSE):** el grado en que el sistema mismo puede ser dañado o afectado como resultado de: a) su exposición o probabilidad de ocurrencia de una presión antrópica o natural sobre los ecosistemas, que a su vez determinan la pérdida de capital natural y reducciones en el flujo de sus servicios ecosistémicos (SE), b) la sensibilidad del sistema socio-ecológico en términos de pérdida de los beneficios que la sociedad deriva de esos SE, y c) la capacidad de adaptación del sistema socio-ecológico a los cambios que se generen producto de ésta (Latterra et al., 2015).

mismos (Latterra et al., 2015).

El Módulo 1 conduce a la cuantificación, la integración y la cartografía de los diferentes componentes de la cascada de SE (Figuras 1 y 2) (Haines-Young y Potschin, 2010). Esto se realiza a partir de tres pasos principales que consideran: a) la evaluación de las FE y/o paisajes, a partir de la selección de atributos que se combinan dentro de variables sustitutas o proxys basadas en índices o modelos de procesos para representar FE (o SE intermedios) (Fisher et al., 2009), b) la evaluación de SE a partir de la o las FE que los soportan (considerando que en general, un SE dado resulta de la interacción entre distintas FE), y c) la evaluación de los beneficios que se derivan de los SE considerando que estos se propagan (Figura 2).

El Módulo 2 se encuentra vinculado al Módulo 1 y se compone de tres elementos principales: a) la exposición, b) sensibilidad y c) la capacidad adaptativa. Los elementos expuestos al cambio de cobertura de suelo son en este caso los SE y el bienestar humano (medido en beneficios). La sensibilidad, por su parte, es el cambio marginal esperado en los beneficios de los SE, frente a un escenario de cambio de uso o cobertura de suelo (Latterra et al., 2015).

Para la mayoría de las aplicaciones de este protocolo, resulta necesario el soporte de un sistema de información geográfica (SIG) y el uso de herramientas de modelado espacial. El marco de aplicación puede consistir en una cuenca, un paisaje o una porción arbitraria del territorio en la que se reconocen elementos del paisaje (e.g., parches, corredores, matrices) relativamente homogéneos, caracterizadas por un **tipo de ecosistema dominante (TED)**. A su vez, esos elementos del paisaje se encuentran conformados por una o más celdas regulares (píxeles), cuyo TED y condición local y de paisaje particular son utilizados a través de este protocolo para obtener el flujo de servicios ecosistémicos o **capacidad funcional**<sup>5</sup> de cada celda. De esta forma, los resultados de la aplicación de este protocolo para cada celda del paisaje bajo estudio pueden ser exportados y mapeados mediante un SIG, o pueden ser obtenidos de forma directa mediante

---

<sup>5</sup> **Capacidad funcional:** Capacidad de los ecosistemas para realizar algunas funciones ecosistémicas relevantes (Latterra et al., 2015).

modelado en SIG en base a los algoritmos y bases de datos provistos por ECOSER.

ECOSER propone un conjunto de indicadores y modelos de funciones consideradas importantes para la evaluación de la capacidad funcional de los paisajes/ecosistemas. Entre los índices/modelos de FE y atributos de los ecosistemas y paisajes disponibles se encuentra el denominado “Protección de acuíferos por cobertura vegetal” (PAC). Este trabajo estará enfocado principalmente en el primer paso del Módulo 1 (Figura 2), abordando la evaluación de la función ecosistémica PAC, la cual se considera pertinente para abarcar el problema planteado (Latterra et al., 2015).

## **2.1.2 FUNCIÓN ECOSISTÉMICA “PROTECCIÓN DE ACUÍFEROS POR COBERTURA VEGETAL”**

El agua subterránea es la fuente de agua más importante y, en muchos casos, la única fuente usada para consumo humano, producción agrícola e industrial. La vulnerabilidad de los acuíferos frente a la contaminación es una propiedad intrínseca del medio. Es una propiedad relativa, no medible y adimensional y su evaluación se realiza admitiendo que es un proceso dinámico e iterativo. La vulnerabilidad puede ser intrínseca (condicionada por las características hidrogeológicas del terreno) y específica (cuando se consideran factores externos como la climatología o el propio contaminante) (Martínez et al., 1998).

En aquellas zonas donde el acuífero es muy vulnerable a la contaminación, determinados tipos de cobertura vegetal (ej. bosques o pastizales) pueden ejercer un rol importante de protección. Si bien no existen estudios locales sobre la dependencia de la calidad de agua sobre la cobertura vegetal (excepto para algunos nutrientes), puede asumirse que la relevancia de los ecosistemas en la protección de la calidad del agua subterránea en un pixel depende del riesgo intrínseco del acuífero a ser contaminado (Latterra et al., 2012). Exceptuando las áreas protegidas, el sector rural se encuentra en su mayor parte bajo algún uso productivo (agrícola, ganadero o forestal). Para estimar la función ecosistémica de protección de acuíferos se asume que cada cobertura vegetal presenta una determinada capacidad de protección (en función del nivel de agroquímicos que

requiera para el desarrollo de la actividad productiva) y que dicha protección cobra mayor relevancia en los píxeles más vulnerables (Barral, 2016).

La vegetación natural protege la calidad de los reservorios de agua subterránea frente a su eventual contaminación por agroquímicos en caso de ser reemplazados por cultivos agrícolas. Por consiguiente, dentro de un análisis de grano grueso, la cobertura natural o seminatural en zonas de recarga y con capacidad de uso agrícola provee un servicio de protección potencial de “1” (en una escala de 0 a 1). Para un análisis de mayor resolución, se considera que esa función de protección varía dentro de las áreas con capacidad de uso agrícola según factores edáficos y geomorfológicos que condicionan la lixiviación “in situ” (Laterra et al., 2011). Como criterios para ponderar la influencia de esos factores sobre la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación pueden utilizarse aquellos considerados por el índice DRASTIC (Aller et al., 1985), según:

Ecuación 1:

$$PAC_i = 1 - (ID_{rel_i} * P_i)$$

Donde:

- $PAC_i$  es la protección de acuíferos por cobertura en el pixel  $i$ ,
- $P_i$  es un factor que refleja el rol de protección de la cobertura vegetal en el píxel  $i$  en función del nivel de insumos necesarios para el desarrollo de la actividad productiva, se asume que un ecosistema más complejo (en términos de su funcionamiento y estructura) requiere menos insumos para llevar a cabo una actividad productiva. Este factor toma valores de 0-1. Cuando el factor es cercano 1 significa que dicho ecosistema es el que requiere mayor cantidad de insumos (agroquímicos) para el desarrollo de la actividad, por lo tanto si la cobertura se encuentra en píxeles muy vulnerables no ejerce ningún tipo de protección. Mientras que si el factor es cercano a 0 implica que la cobertura no requiere de insumos (potenciales contaminantes) y ejerce una fuerte protección al acuífero (Barral, 2016).
- $ID_{rel_i}$  es el índice DRASTIC relativizado empleado como medida de la vulnerabilidad del acuífero en el pixel  $i$ . Este índice toma valores de 26-226 que luego deben relativizarse en una

escala de 0-1, donde cero es la nula vulnerabilidad y uno la máxima.

### 2.1.3.1 Índice DRASTIC

Los índices más utilizados para evaluar la vulnerabilidad de acuíferos son GOD (Foster, 1987) y DRASTIC (Aller et al., 1987), los cuales consideran las características físicas propias del marco hidrogeológico que afectan a los potenciales procesos de contaminación del agua. El método DRASTIC clasifica y pondera parámetros intrínsecos, reflejo de las condiciones naturales del medio y es el más difundido para determinar la vulnerabilidad de acuíferos (Barral, 2016). Los parámetros considerados son:

-Profundidad del Acuífero (D): representa el espesor de suelo que debe atravesar el contaminante antes de alcanzar al agua subterránea, el valor más alto de reclasificación se determina cuando el acuífero se encuentra a muy poca profundidad.

-Recarga Neta (R): indica la tasa de infiltración por unidad de superficie. Para valores superiores a 255 mm de infiltración se da el valor máximo de puntuación.

-Litología del Acuífero (A): representa la capacidad del medio poroso y/o fracturado para transmitir los contaminantes. Los valores son asignados de acuerdo a la litología de la zona.

-Naturaleza del Suelo (S): este parámetro se refiere a la zona no saturada y representa la capacidad del suelo en frenar el movimiento de los contaminantes. El valor se establece de acuerdo a la textura del suelo, y las texturas gruesas como arenas y gravas obtienen la máxima puntuación.

-Pendiente de la Superficie (T): representa la topografía del lugar, según la cual se incrementa o disminuye el escurrimiento superficial. Si las pendientes son bajas, mayor es la probabilidad de infiltración de contaminantes por lo tanto se determina una mayor puntuación.

-Naturaleza de la Zona No Saturada (I): representa la textura del suelo de la zona no saturada. Consiste en el material existente tanto en el suelo superficial, así como las capas de lecho de roca sin capacidad de retención para el agua subterránea.

-Conductividad Hidráulica del Acuífero (C): la conductividad hidráulica se refiere a la velocidad a la que los materiales del acuífero transmiten el agua. Constituye la capacidad del acuífero en transmitir horizontalmente los contaminantes, a mayor conductividad mayor puntuación.

Cada una de estas variables está dividida en una serie de intervalos, a los cuales se le asigna una puntuación que varía entre 1 y 10, siendo el valor 10 el de máxima vulnerabilidad (Tabla 1). La puntuación correspondiente a cada variable se multiplica por un factor de ponderación comprendido entre 1 y 5, en función de la importancia relativa de cada parámetro en el conjunto (Barral, 2016). A mayor importancia del parámetro, mayor factor de ponderación (Tabla 2).

El cálculo del índice DRASTIC, viene dado por la siguiente expresión:

Ecuación 2:

$$ID = D_i * D_w + R_i * R_w + A_i * A_w + S_i * S_w + T_i * T_w + I_i * I_w + C_i * C_w$$

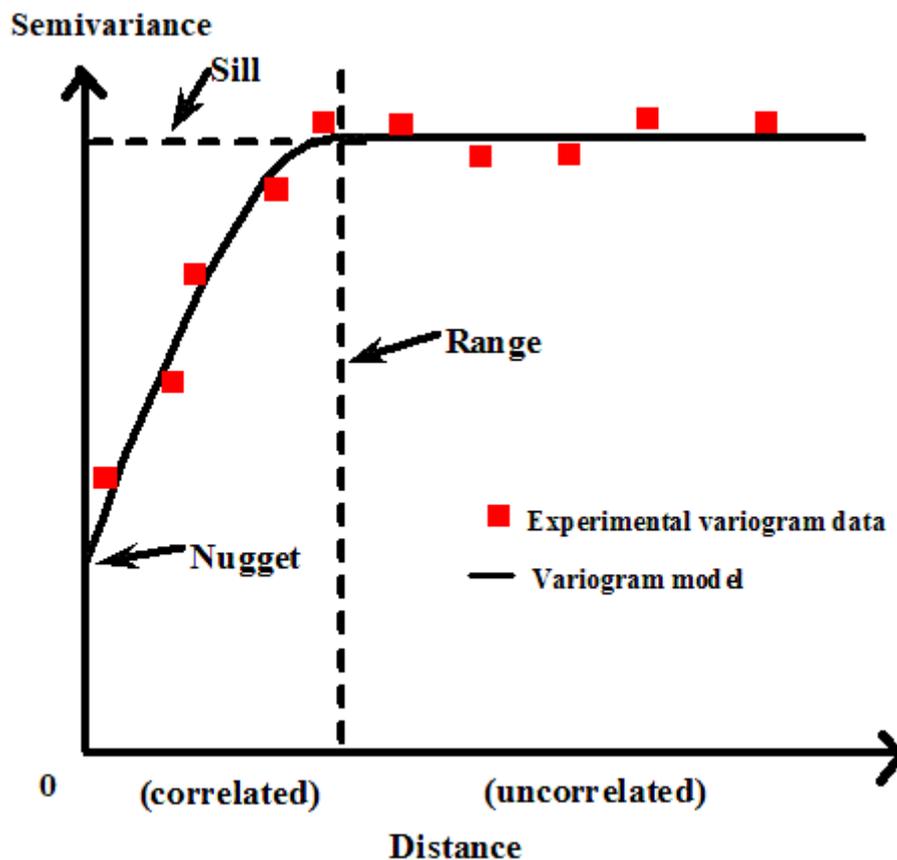
Siendo “i” el pixel evaluado y “w” el índice de ponderación de cada parámetro.

## 2.2 MÉTODO GEOESTADÍSTICO “KRIGING”

El krigeaje o krigeado es un método geoestadístico de estimación de puntos, el cual se utilizará en este trabajo para el cálculo del parámetro R del índice DRASTIC. El mismo utiliza un modelo de variograma para la obtención de los ponderadores que se darán a cada punto de referencia usado en la estimación (Burgess y Webster, 1980).

El gráfico de las semivariancias en función de la distancia a un punto es llamado variograma o semivariograma (Gráfico 1). El variograma o semivariograma es una herramienta que permite analizar el comportamiento espacial de una variable sobre un área definida, obteniendo como resultado un variograma experimental que refleja la distancia máxima y la forma en que un punto tiene influencia sobre otro punto a diferentes distancias. A partir de una cierta distancia, la semivariancia no aumentará con la distancia y se estabilizará en un valor igual a la variancia

media, dando a esa región el nombre de meseta, silo o patamar (sill). La distancia entre el inicio del semivariograma y el comienzo del silo recibe el nombre de rango (range). Al extrapolar la curva del semivariograma para la distancia cero, podemos llegar a un valor no nulo de semivariancia; este valor recibe el nombre de efecto pepita o Nugget Effect (GIS Geography, 2018). El silo, el rango y la pepita, son los parámetros del modelo matemático que se ajusta al variograma, y sirven para realizar la estimación por medio de la metodología del krigeaje.



**Gráfico 1:** Variograma experimental con un modelo de variograma ajustado al mismo. Fuente: Hassig, et al., 2010.

## 3. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

#### 3.1.1 Ubicación y extensión

La cuenca Norte se encuentra, como su nombre lo indica, al norte de la provincia de Mendoza y tiene 22.800 km<sup>2</sup> de superficie. Se extiende de oeste a este, desde las últimas estribaciones de la precordillera de Los Andes hasta el curso del río Desaguadero, límite político de las provincias de Mendoza y San Luis. Al norte, alcanza las lagunas del Rosario y Guanacache, y al sur ponen coto a la cuenca, la cerrillada de Tupungato y el anticlinal Lunlunta-El Carrizal (Hernández et al., 2012). Las coordenadas POSGAR entre las que se encuentra comprendida son:

Faja: 19H

- Y (norte): 6.296.000 ; 6.247.000

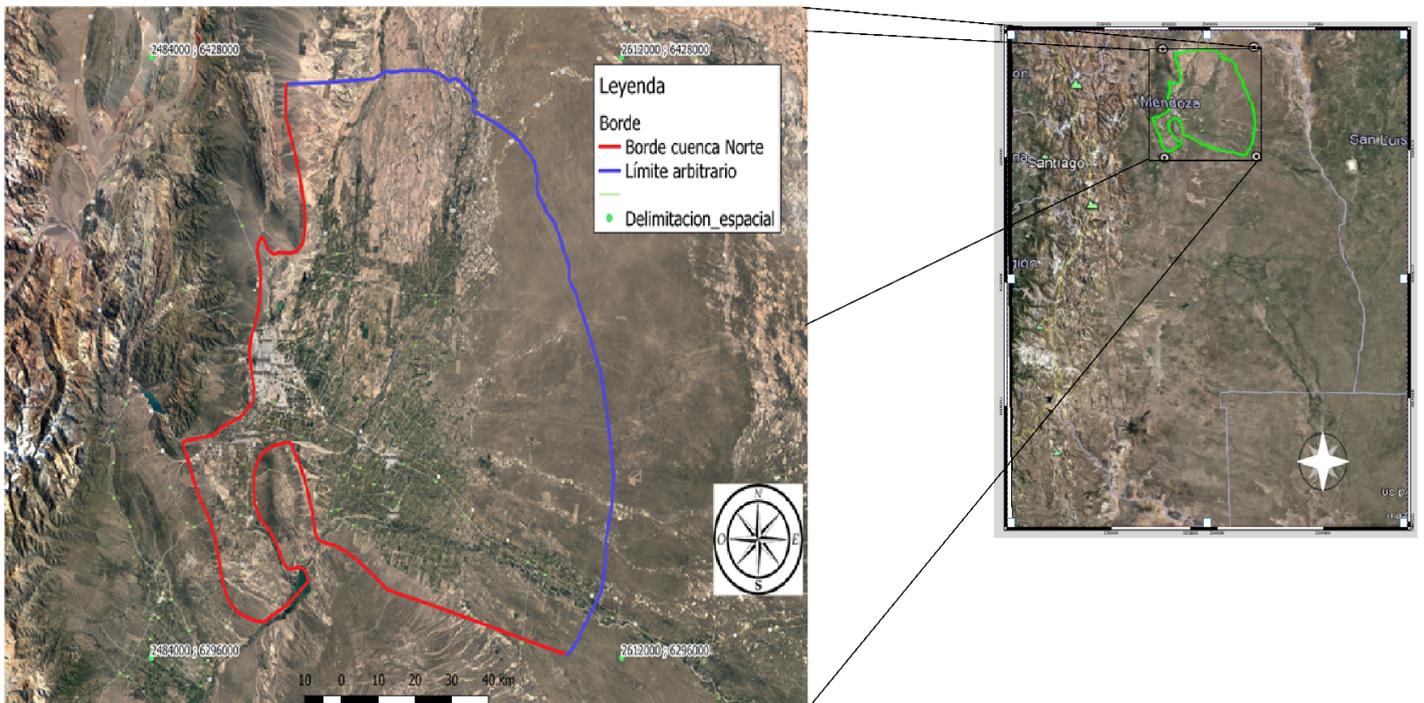
X (este): 2.491.000 ; 2.611.000

A los fines de identificar al proyecto, el área de estudio ha sido mencionada como la cuenca Norte o de los ríos Mendoza y Tunuyán Inferior. Sin embargo, para su estudio, en virtud de la deficiencia de información en sus sectores distales norte y este, se decidió arbitrariamente limitarla utilizando una isolínea de niveles estáticos del agua subterránea que permitiese incluir la mayor parte de la cuenca en la que se explota la misma.

El presente trabajo se basa en el estudio del tipo de cuenca hidrogeológica, entendiéndose la misma como “unidad fisiográfica que contiene un gran acuífero o varios conectados o interrelacionados, cuyas aguas fluyen a un desagüe común, y que está delimitada por una divisoria de aguas subterránea” (UNESCO/WMO, 1992).

Para este limitado espacio físico de la cuenca hidrogeológica Norte, que ocupa aproximadamente 10.000 km<sup>2</sup>, conviene aclarar que, a lo largo de la tesina, se utilizarán para identificarlo los términos “área de estudio” y “cuenca Norte” indistintamente.

En la Figura 4 se presentan los bordes de la cuenca Norte en color rojo y los límites que se asumieron para circunvalar el área de estudio en color azul.



**Figura 4:** Ubicación del área de estudio. En la imagen de la derecha se encuentra el área de estudio ubicada dentro de la provincia de Mendoza. En la imagen de la izquierda se ve la zona ampliada, con las coordenadas correspondientes señalizadas mediante puntos verdes. Fuente: Google Physical, s.f.

### 3.1.2 Características climatológicas

El área en estudio se caracteriza por tener un clima desértico; cálido moderado en la llanura, y templado en la zona precordillerana. La precipitación media anual promedio es de 224 mm, haciendo que la agricultura en casi toda la provincia sólo sea posible mediante la sistematización del riego. Esto genera la concentración de las áreas cultivadas alrededor de las zonas de disponibilidad de agua, principalmente los ríos, formando oasis. Los factores determinantes del clima, la altitud respecto al nivel del mar y latitud geográfica, la lejanía al Océano Atlántico y la anteposición de la cordillera de Los Andes a los vientos húmedos provenientes del Océano Pacífico, hacen que no exista moderación de los parámetros meteorológicos y por lo tanto el clima es del tipo continental. Consecuencia de esto, son las grandes variaciones estacionales de las

condiciones atmosféricas (Departamento General de Irrigación, 2006).

### **3.1.3 Aspectos hidrogeológicos**

A esta cuenca aportan sus aguas los ríos Mendoza y Tunuyán; este último a través de su tramo inferior, el que conduce sólo parte del derrame del río luego de haber sido almacenada en el dique El Carrizal. Sus caudales son producto del derretimiento de las nieves precipitadas en la alta montaña y sus regímenes son de tipo nival: caudales crecientes desde la primavera al verano y decrecientes hacia el invierno. Ambos constituyen las únicas fuentes de las aguas que allí se disponen para el abastecimiento de poblaciones, la agricultura y la industria. El agua subterránea, resultado de la recarga con agua de ambos ríos, es utilizada con los mismos fines. La lluvia que en ella precipita es la propia de climas que califican como semiáridos a áridos, por lo que su contribución suele no ser contemplada en la mayoría de los desarrollos antrópicos (Hernández et al., 2012).

Sus principales acuíferos se encuentran en una cubierta sedimentaria de edad neoterciaria, cuartaria y reciente. El sustrato está formado por sedimentos impermeables del terciario superior, sobre los que se acumulan depósitos aluvionales y fluviales que fueron aportados por los ríos Mendoza y Tunuyán, éste en su tramo inferior. La sedimentación cuartaria dio origen a conos aluviales, en cuyos ápices se encuentran los ingresos de esos ríos a la cuenca, que se abren con forma de abanico hacia sus zonas distales a partir de las cuales se inicia una extensa llanura de inundación (Hernández et al., 2006).

Los ríos aportantes mencionados, a través de los siglos, transportaron parte de los materiales cordilleranos que contribuyeron al relleno sedimentario de la cuenca para dar origen a una extensa y potente llanura, bajo cuya superficie se desarrollaron los acuíferos que hoy se explotan. Esos acuíferos constituyen una sola masa de agua en toda la extensión de la cuenca, lo que implica que las acciones que se ejercieren en un punto o sector de ella, puede repercutir en forma más o menos sensible en una mayor cantidad de puntos de la misma (Hernández et al., 2012).

El agua subterránea almacenada en la cuenca es del orden de los 275.000 hm<sup>3</sup>. El sentido del

flujo del agua subterránea se verifica desde el oeste en forma radial hacia el sur (subcuenca El Carrizal), este y norte en el caso del área de influencia del río Mendoza, y de sur a norte y este en el caso del Tunuyán Inferior. La cuenca tendría como descargas naturales a las lagunas de Guanacache al norte y al río Desaguadero al este pero, dada el uso intensivo del agua que se realiza en el oasis, las mismas permanecen sin agua largos períodos de tiempo (Hernández, et al., 2006).

### **3.1.4 Descripción socio-económica**

La provincia de Mendoza cuenta con 1.738.929 habitantes según el censo de población de 2010, de los cuales el 72% (1.247.168 habitantes) vive en el área correspondiente al Oasis Norte (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2010).

El 89% (más de 900.000 habitantes) de la población de la cuenca del río Mendoza habita en zonas urbanas, mientras que el resto lo hace en zonas rurales (Departamento General de Irrigación, 2006).

La agricultura practicada en los oasis constituye la base de la economía provincial. La subcuenca de riego del río Tunuyán inferior cuenta con una superficie de 101.438 ha con derechos de riego superficial, y también hace uso intensivo del agua subterránea que, en forma exclusiva, irriga 17.545 ha del total cultivado. Se cultivan 86.744 ha. con aguas superficiales y subterráneas. Del área considerada, el 34% es utilizada para actividades agrícolas, y el resto está ocupada básicamente por vegetación natural (64%), construcciones e infraestructura (1%) y cuerpos de agua (1%). Esta subcuenca de riego es netamente vitícola, según la superficie empadronada, dicha actividad ocupa el 64%, mientras que los frutales ocupan el 17%. Además, tienen importante presencia los olivos (7%) y las hortalizas (6%), junto con pasturas (3%) y forestales (3%). La superficie cultivada con vid, sumando los viñedos con derecho de riego y los que se basan en aguas subterráneas, superan las 50.000 ha (Departamento General de Irrigación, 2006). El oasis irrigado por el río Mendoza, muestra como principales cultivos a la vid para vinificar y los frutales de carozo, destacándose la ciruela y el durazno. También es importante la horticultura en

el cinturón verde que abastece el Área Metropolitana de Mendoza. Se destaca la producción de vid con un 61,7%, luego hortalizas con 15,7%, siembra 7,6%, frutales 7,4%, olivos 3,1% y forestales 0,9% entre otros. La superficie cultivada en esta cuenca es de unas 158.000 ha empadronadas con derecho de riego, en las 59 inspecciones de cauce de la cuenca (Departamento General de Irrigación, 2006).

## 3.2 METODOLOGÍA

A continuación se detallan los pasos llevados a cabo en el cálculo de la función ecosistémica PAC en la cuenca Norte de Mendoza, a partir de la metodología que propone el protocolo ECOSER (Barral, 2016).

### 1° Recopilación de los datos asociados a las variables de análisis PAC y DRASTIC:

- Profundidad del acuífero: se obtuvo a partir del mapa “Profundidad agua subterránea (Variable D)” del proyecto “Cartografía de la vulnerabilidad intrínseca frente al peligro de contaminación de agua subterránea en el acuífero de la cuenca norte [Mendoza - Argentina]” (Sortino, 2013).
- Tasa de infiltración por unidad de superficie (recarga neta): se utilizaron los datos de niveles estáticos del sistema de pozos de monitoreo del Centro Regional de Aguas Subterráneas (CRAS) - Instituto Nacional del Agua (INA).
- Litología del acuífero: datos obtenidos del Servidor de Mapas del Sistema de Información Geológico Ambiental Minero (SIGAM) del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) (<http://sigam.segemar.gov.ar/>) y del “Mapa hidrogeológico con referencia a las cuencas de aguas subterráneas” del proyecto “Inventario de Recursos para la Planificación y Gestión de la Región Andina Argentina” (Torres y Zambrano, 1996).
- Textura de suelos: datos proporcionados por la Cátedra de Geomática (Facultad de Ciencias Agrarias) a partir de relevamientos realizados en el Oasis Norte de Mendoza, complementado con mapa “Disponibilidad de agua en suelos” del proyecto “Modelación hidrológica de la cuenca norte de Mendoza” del Centro Regional de Aguas Subterráneas (CRAS) -

Instituto Nacional del Agua (INA).

- Pendiente: ráster obtenido del Modelo Digital de Elevación, descargado de Global Data Explorer (<https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>), con una resolución espacial de 30 m.
- Textura del suelo de la zona no saturada: datos obtenidos del Servidor de Mapas del Sistema de Información Geológico Ambiental Minero (SIGAM) del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) (<http://sigam.segemar.gov.ar/>) y del “Mapa geomorfológico de la provincia de Mendoza” perteneciente al proyecto "Inventario de Recursos para la Planificación y Gestión de la Región Andina Argentina" (Torres y Zambrano, 1996).
- Conductividad hidráulica: datos obtenidos a partir del mapa de isopermeabilidad del proyecto “Modelación hidrológica de la cuenca norte de Mendoza” del Centro Regional de Aguas Subterráneas (CRAS) - Instituto Nacional del Agua (INA) (Hernández, et al., 2012).
- Uso/cobertura de la tierra: se trabajó con imágenes satelitales de la zona de estudio, las cuales se obtuvieron del satélite LANDSAT 8 y sus fechas de captura fueron 12 de diciembre de 2017, y 7 y 14 de febrero de 2018. Se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), pudiéndose estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación basado en valores de las bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja.

## 2° Cálculo del Índice Drastic, “ID<sub>reli</sub>”:

Para llegar al cálculo del índice DRASTIC, se trabajó por separado cada variable dentro del software “Qgis” (<https://www.qgis.org/es/site/>) de la siguiente manera:

- **Parámetro D**: se procedió a la digitalización del mapa “Profundidad del agua subterránea (Variable D)”, asignando los valores de profundidad correspondientes a cada polígono, y luego se rasterizó la nueva capa vectorial.
- **Parámetro R**: la transferencia de datos espaciales desde datos alfanuméricos (tabla de datos de niveles estáticos de agua subterránea), se realizó mediante archivos con formato CSV hacia el software QGIS. Luego se obtuvieron los mapas de cota de agua de cada año en estudio mediante superficies de interpolación con la aplicación del método geoestadístico kriging ordinario, con el

uso del programa Saga Gis (<http://www.saga-gis.org/en/index.html>). A continuación se establecieron las variaciones de altura de cota entre los años consecutivos del período de 1987-2007 con las cuales se realizó el mapa de cotas en metros/año para los 20 años tomados a consideración. Finalmente se multiplicó este último mapa con el mapa de coeficiente de almacenaje, el cual se consideró 0,1 para el acuífero libre y 0,001 para el acuífero confinado (Torres y Zambrano, 1996).

El cálculo de la recarga entonces estaría dado por la siguiente ecuación según el método de variación del nivel freático:

Ecuación 3:

$$R = \frac{S_y \times \Delta h}{\Delta t}$$

Donde:

R: la recarga del acuífero,  $S_y$  es el coeficiente de almacenaje,  $\Delta h$  es la variación de altura de cota y  $\Delta t$  es la variación del tiempo.

- **Parámetro A:** se procedió a la digitalización del WMS (Web Map Service) "Unidad\_Geologica\_25M" en conjunto con el "Mapa geomorfológico de la provincia de Mendoza" (Torres y Zambrano, 1996). Se asignaron valores según la Tabla 1 a cada unidad hidrogeológica y luego se rasterizó la capa resultante.

- **Parámetro S:** los datos proporcionados por la cátedra de Geomática se trabajaron primero en el software Microsoft Excel. Para cada capa de suelo (las cuales conforman a su vez los diferentes perfiles de suelo) se calculó el porcentaje de arcilla, limo americano y arena americana a partir del volumen de sedimentación (VS), según las siguientes ecuaciones (Mastrantonio y Pérez, s.f.):

Ecuación 4:

$$\text{Arcilla (\%)} = - 32,81 + 0,4973 * VS$$

Ecuación 5:

$$\text{Limo (\%)} = - 49,95 + 0,77 * \text{VS}$$

Ecuación 6:

$$\text{Arena (\%)} = 182,76 - 1,2678 * \text{VS}$$

Luego se llevó a cabo una ponderación a partir del espesor que ocupa cada capa en los distintos perfiles, y se determinó la clase textural de los mismos mediante el “triángulo de clasificación de suelos según la textura” de acuerdo con el sistema internacional.

Los datos se exportaron a Qgis como archivos “csv”. Se asignaron valores según la Tabla 1 para cada textura y luego se rasterizaron por interpolación.

En la zona fuera del oasis, lugar donde no se realizaron relevamientos desde la cátedra de Geomática, se procedió a la poligonización del mapa “Suelos de Mendoza” (Regairaz, 1996).

- **Parámetro T:** a partir del MDE se calculó la pendiente en porcentaje. Se rellenaron los sumideros del Modelo Digital de Elevación (MDE), mediante la herramienta Fill sinks (Wang & Liu).

- **Parámetro I:** se procedió a la digitalización del WMS (Web Map Service): “Unidad\_Geologica\_25M” en conjunto con el “Mapa Geomorfológico de la provincia de Mendoza” (Abraham, 1996). Se asignaron valores según la Tabla 1 a cada unidad geológica y luego se rasterizó la capa resultante.

- **Parámetro C:** las curvas que conectan puntos de igual permeabilidad, fueron exportadas al software Qgis desde Autocad mediante un archivo en formato “dxf”. A partir de estas curvas se generaron polígonos con los datos de permeabilidad que luego se convirtieron a ráster.

Para cada uno de los parámetros “D”, “R”, “T” y “C” se generó una nueva capa ráster donde el valor del píxel es el valor asignado al parámetro de acuerdo a la Tabla 1, mediante la herramienta “Reclassify by table”. Luego se aseguró de que todas las capas tuvieran el mismo sistema de

proyección (POSGAR 94/ Argentina 2) y la misma resolución espacial para generar los resultados correspondientes de manera eficaz.

Finalmente se insertó la ecuación 2, en la calculadora ráster de Qgis, obteniendo el mapa de vulnerabilidad intrínseca del acuífero en el área de estudio. Este último mapa del índice DRASTIC, se relativizó en una escala de 0-1.

**Tabla 1:** Rango de valores de los parámetros empleados en el Índice DRASTIC (Aller et al., 1987)

Parámetro D		Parámetro S		Parámetro T		Parámetro C	
Rango (m)	Valor	Rango	Valor	Rango (%)	Valor	Rango (m/día)	Valor
<1.5	10	Arcilla no expansiva y agregada	1	0-2	10	<4	1
1.5-5	9	Suelo orgánico	2	2-6	9	4-12	2
5-10	7	Marga arcillosa	3	6-12	5	12-28	4
10-20	5	Marga limosa	4	12-18	3	28-40	6
20-30	2	Marga	5	>18	1	40-80	8
>30	1	Marga arenosa	6			>80	10
Parámetro R		Parámetro A					
Rango (mm)	Valor	Arcilla expansiva y/o agregada		Descripción		Rango	
0-50	1			Arcillas, margas, limos		2	
50-100	3	Turba		Ígneas/metamórficas		3	
100-180	6	Arena		Ígneas/metamórficas/alteradas		4	
180-255	8	Grava		Alternancia de areniscas, arcillas y calizas		6	
>255	9	Delgado o ausente		Areniscas masivas		6	
Parámetro I							
Descripción		Valor					
Arcilla, limo, margas		1					
Esquistos, pizarras		3					
Calizas		6					
Areniscas		6					
Alternancia de calizas, areniscas y arcillas		6					
Arenas y gravas con contenido de arcilla		6					
Metamórficas, ígneas		4					
Arenas y gravas		8					
Volcánicas		9					
Calizas carstificadas		10					

**Tabla 2:** Índices de ponderación empleados en el Índice DRASTIC (Aller et al., 1987)

Parámetro	Índice de ponderación (w)
D – Profundidad del acuífero	5
R - Recarga	4
A- Naturaleza del acuífero	3
S - Naturaleza del suelo	2
T – Pendiente del terreno	1
I – Impacto de la zona no saturada	5
C – Conductividad hidráulica	3

### 3° Cálculo del rol de protección de la cobertura vegetal en el píxel i, “Pi”:

Para el cálculo de este factor de la ecuación PAC, primero se necesita determinar los **tipos de ecosistemas dominantes (TED)**. Con ese fin, se debe cargar una capa ráster donde el valor del píxel represente el uso/cobertura de la tierra (conocida también por sus siglas en inglés LULC-land use land cover).

En este estudio se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), a partir del cual se procedió a la identificación de los Tipos de Ecosistemas Dominantes (TED), mediante la realización de una clasificación supervisada con el método de la distancia mínima. Se obtuvieron los TED Agrícola y Nativo.

Luego del procedimiento anterior, se asignó a cada cobertura un valor de “Pi”, para lo cual se consideró usar una modificación de los valores que se encuentran en el protocolo ECOSER. Los cultivos en el protocolo poseen un valor de  $P_i=95\%$  y suponiendo que el uso de agroquímicos es menor por los tipos de cultivos presentes en la zona de estudio, se eligió un valor de  $P_i$  de 70%. En el caso del Monte Nativo se utilizó un  $P_i=5\%$ , debido a la presencia de escasa ganadería extensiva (Teruya, 2015).

#### 4° Cálculo del índice de protección de acuíferos por cobertura, PAC:

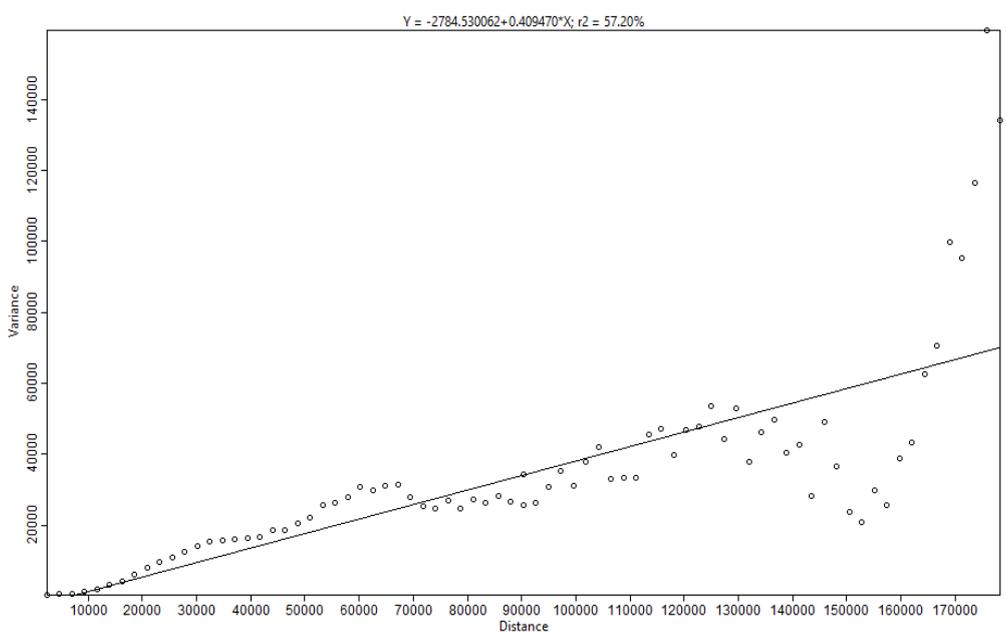
Por último se insertó la ecuación 1 en la calculadora ráster del programa Qgis, dando como resultado un mapa que representa esta variable.

Los mapas resultantes deberán permitir el análisis de las zonas donde el acuífero presenta la mayor vulnerabilidad frente a la contaminación, el rol que la vegetación cumple en su protección de acuerdo a la cantidad de agroquímicos que se necesiten para su mantenimiento, y a su vez, la comparación de ambos entre los distintos usos del suelo dentro de la cuenca.

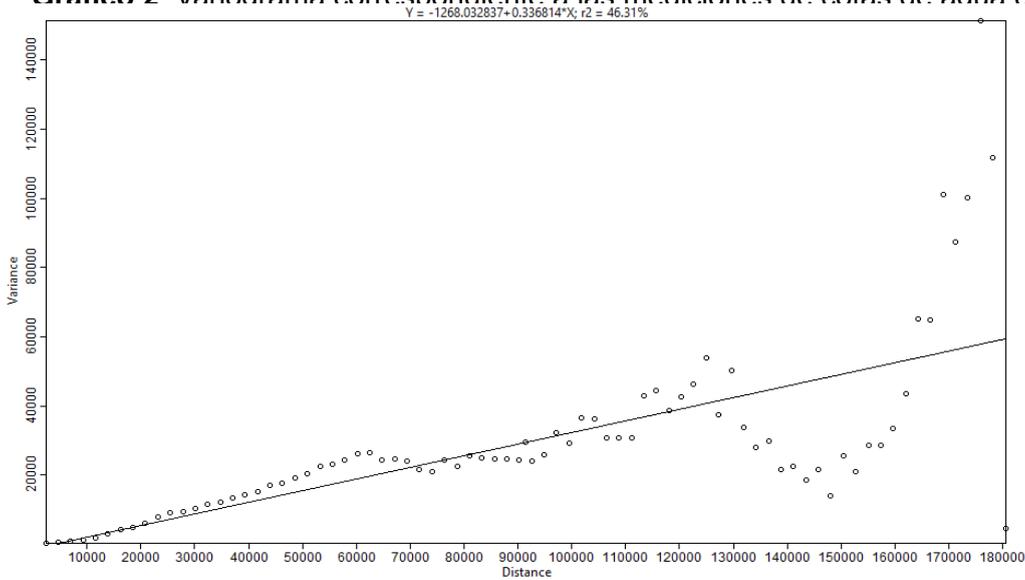
## 4. RESULTADOS

### 4.1 RESULTADOS PARCIALES PARA EL CÁLCULO DE LA RECARGA NETA.

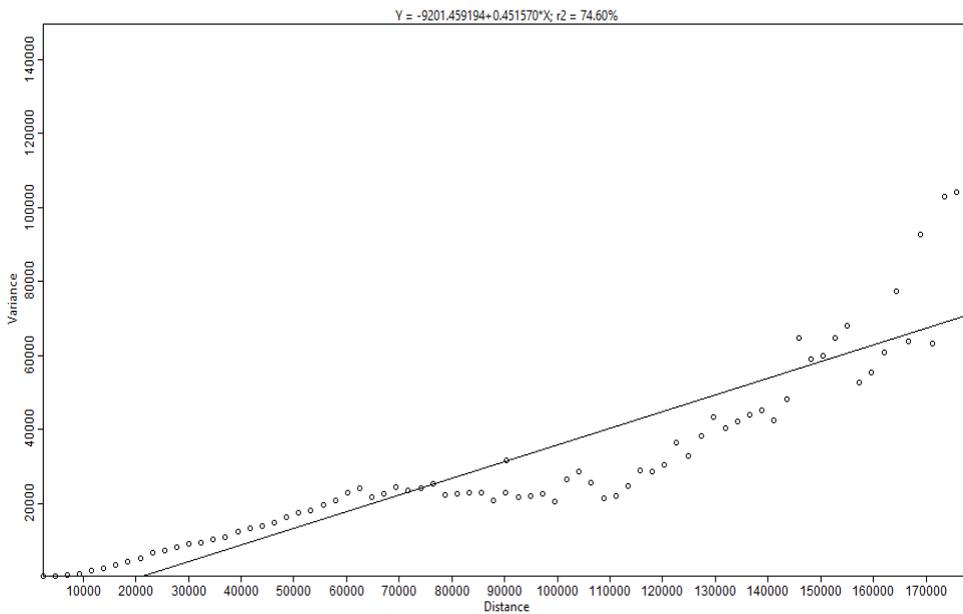
En los Gráficos 2, 3 y 4 se muestran algunos de los variogramas obtenidos para los datos de cotas de agua de cada año. A partir de los variogramas experimentales se ajustaron modelos esféricos, cuyos parámetros son los de la Tabla 3. Luego con estos parámetros se realizó la interpolación obteniéndose mapas de cota de agua en metros (Figura 5).



**Gráfico 2:** Variograma correspondiente a las mediciones de cotas de agua del año 2007.



**Gráfico 3:** Variograma correspondiente a las mediciones de cota de agua del año 2003.

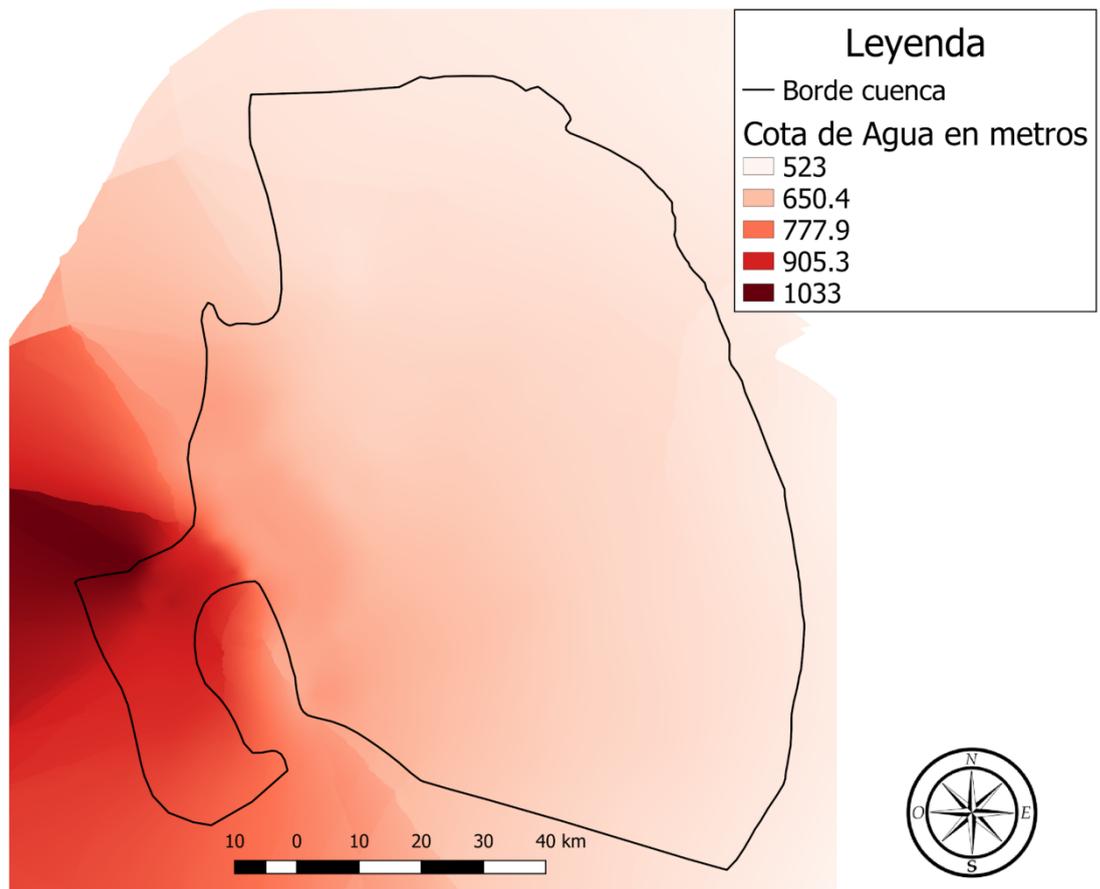


**Gráfico 4:** Variograma correspondiente a las mediciones de cota de agua del año 1987.

**Tabla 3:** Parámetros de modelos esféricos (rango, pepita y meseta) según año de medición de la cota de agua.

Año de medición de la cota de Agua	Rango (m)	Pepita	Meseta
1987	150.000	0	70.000

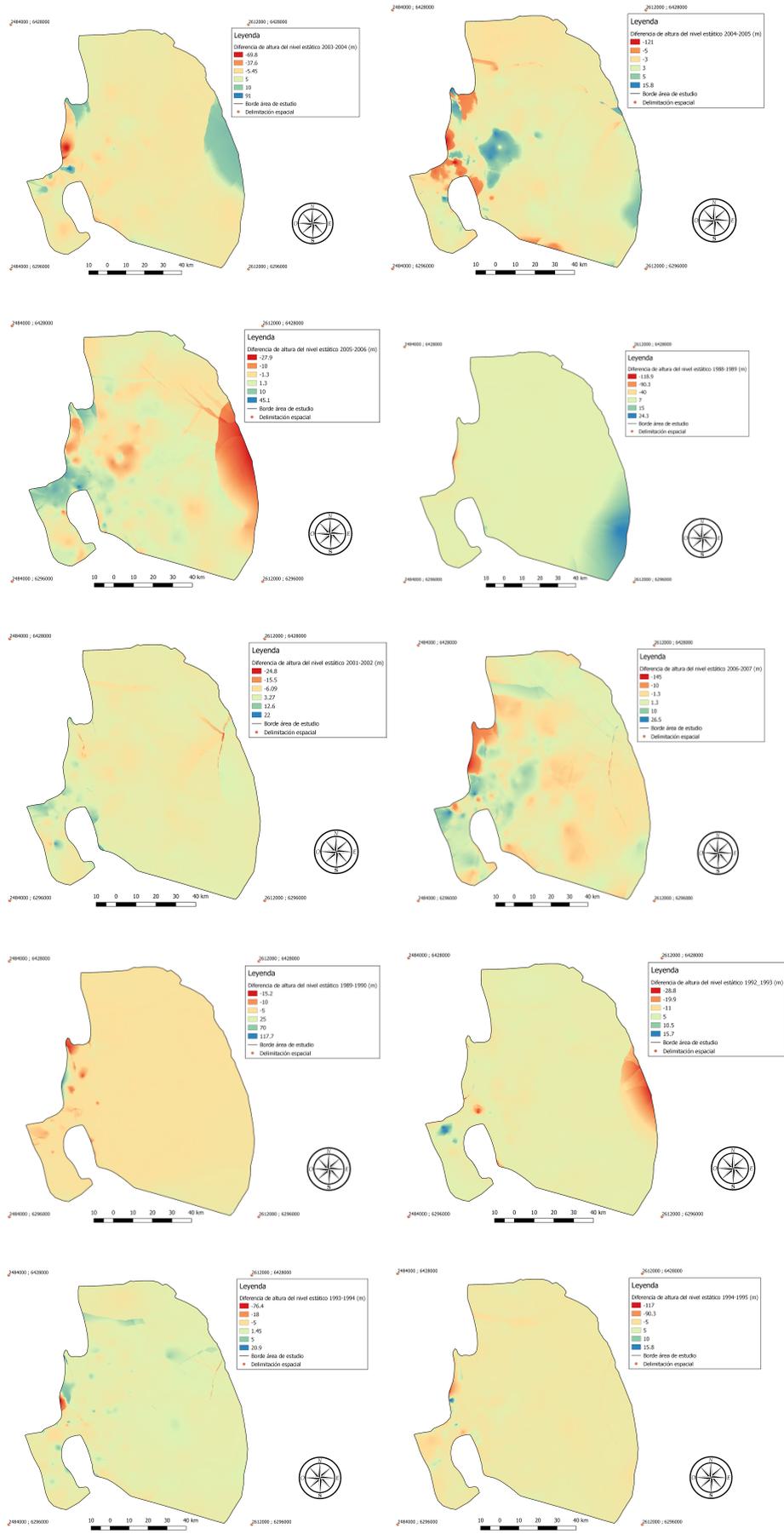
1988	135.000	0	50.000
1989	130.000	0	50.000
1990	135.000	0	50.000
1992	90.000	0	30.000
1993	90.000	0	28.000
1994	90.000	0	30.000
1995	93.000	0	28.000
2001	90.000	0	25.000
2002	90.000	0	25.000
2003	80.000	0	25.000
2004	80.000	0	30.000
2005	80.000	0	25.000
2006	80.000	0	22.500
2007	75.000	0	30.000



**Figura 5:** Superficie de interpolación donde está representada la cota de agua subterránea en metros para el año 2007.

Luego de obtenidos los mapas para los 15 años tomados a consideración, se restaron las capas ráster de los años consecutivos, teniendo como resultado la variación anual de la altura del nivel estático del agua (Figura 6). Esto permitió calcular la recarga y descarga media anual.





**Figura 6:** Mapas de diferencia anual de altura del nivel estático del agua subterránea, medido en

metros.

## **4.2. RESULTADOS FINALES**

Se describen a continuación los mapas generados para cada factor de índice DRASTIC, además del mapa de vulnerabilidad del acuífero que surge a partir de los mismos. Y finalmente se expone el mapa de la función Protección de Acuíferos por Cobertura.

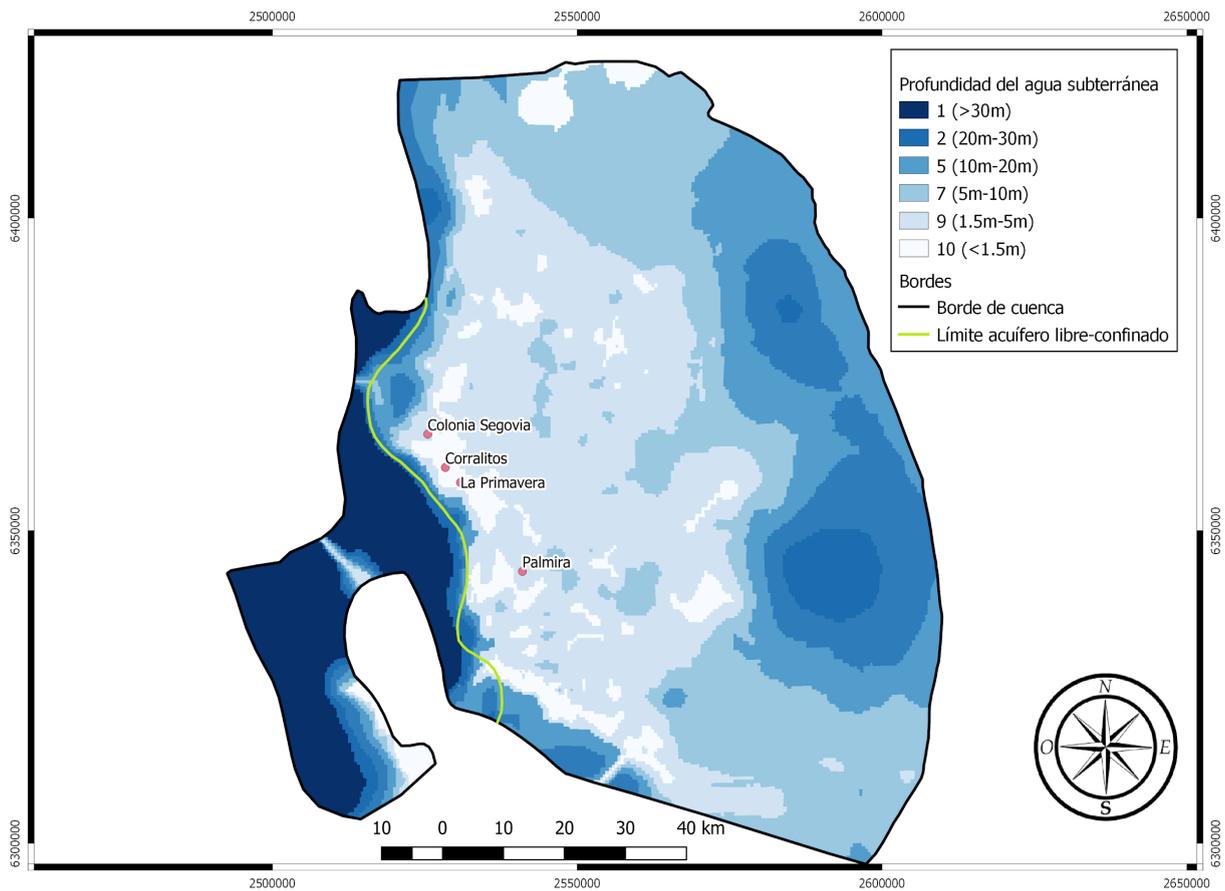
### **4.2.1. Mapas de los Parámetros que conforman el Índice DRASTIC**

#### **4.2.1.1. Profundidad del acuífero (D)**

En el mapa correspondiente al parámetro D de la Figura 7, se visualizan seis rangos de profundidad. La zona de mayor profundidad (>30 m) se identifica en color azul oscuro y representa el menor valor en la clasificación, mientras que la menor profundidad (<1,5 m) se identifica en color blanco y corresponde al máximo valor en la clasificación.

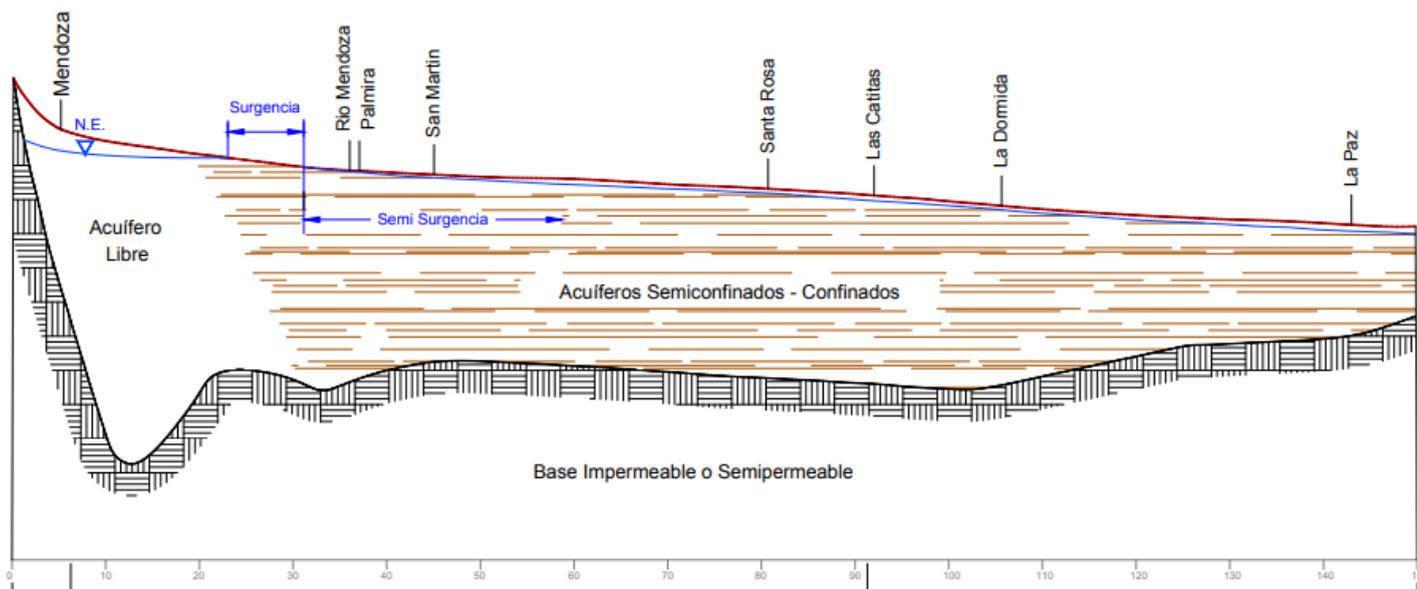
Dentro de las zonas con menor profundidad, la existencia de capas menos permeables origina una extensa área de surgencia cuyo eje mayor, de dirección NO- SE, es transversal al flujo del agua subterránea (Hernández et al., 2012). Abarca 250 km<sup>2</sup>, desde Palmira al Sur hasta Colonia Segovia al Norte, pasando por Km 11, La Primavera y Los Corralitos (Figura 7).

Hacia el este de la zona de surgencia la profundidad del acuífero aumenta levemente, sin embargo, los sectores con mayores profundidades se localizan al oeste, coincidiendo con la zona de acuífero libre (Figura 7 y Figura 8). Este área de nacimiento del cono aluvial del río Mendoza, contiene un gran espesor sedimentario de gravas y arenas, lo que conlleva a que la zona saturada esté bastante alejada de la superficie (Sortino, 2013).



**Figura 7:** Valores de profundidad del acuífero (en metros) reclasificados según la Tabla 1.

. Los puntos indican la ubicación espacial de las localidades que abarca la zona de surgencia.



**Figura 8:** Perfil de la cuenca Norte, trazado en dirección oeste-este (desde la ciudad de Mendoza hasta La Paz); vista desde el Sur hacia el Norte (Hernández et al., 2012).

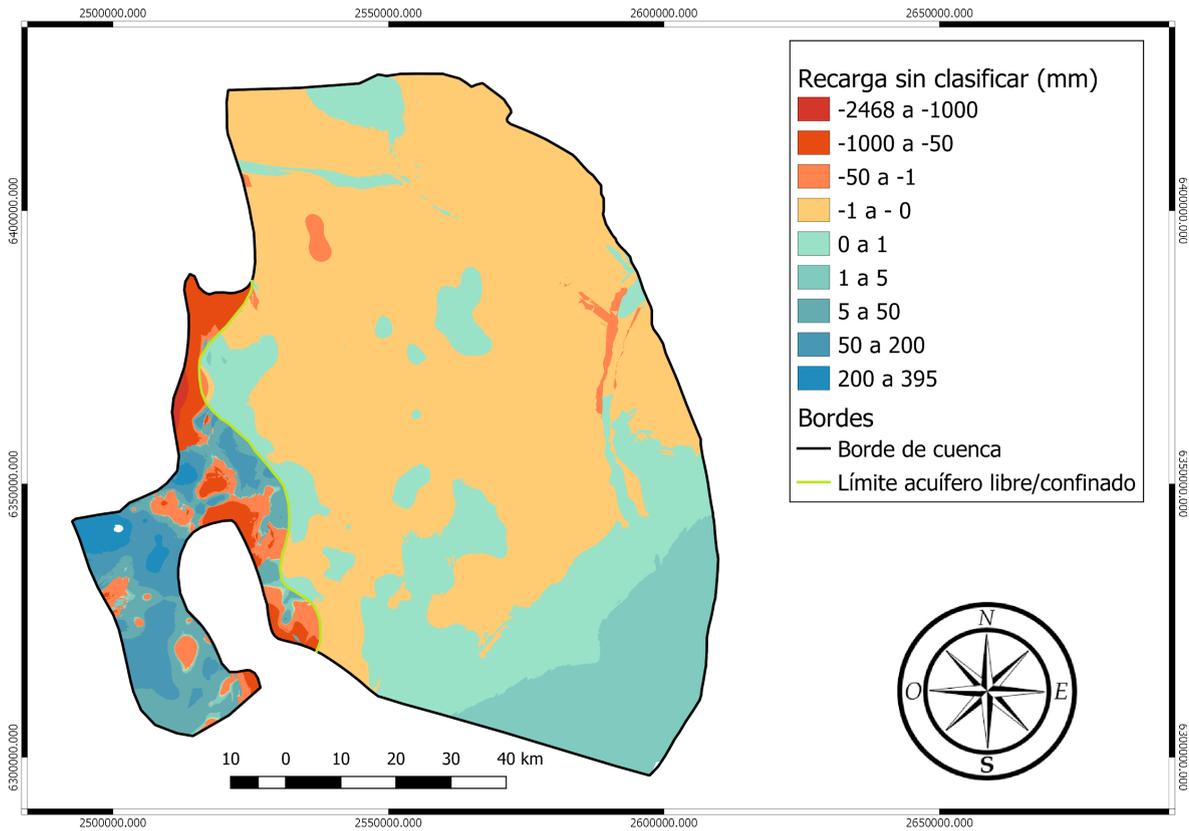
#### **4.2.1.2. Recarga Neta (R)**

Los valores de cota analizados para los diferentes años determinaron zonas de descarga y de recarga promedio anual. A modo representativo, se colocó en el mapa de reclasificación (Figura 10) el valor 0 para las zonas de descarga, las cuales no son consideradas para el análisis del Índice DRASTIC.

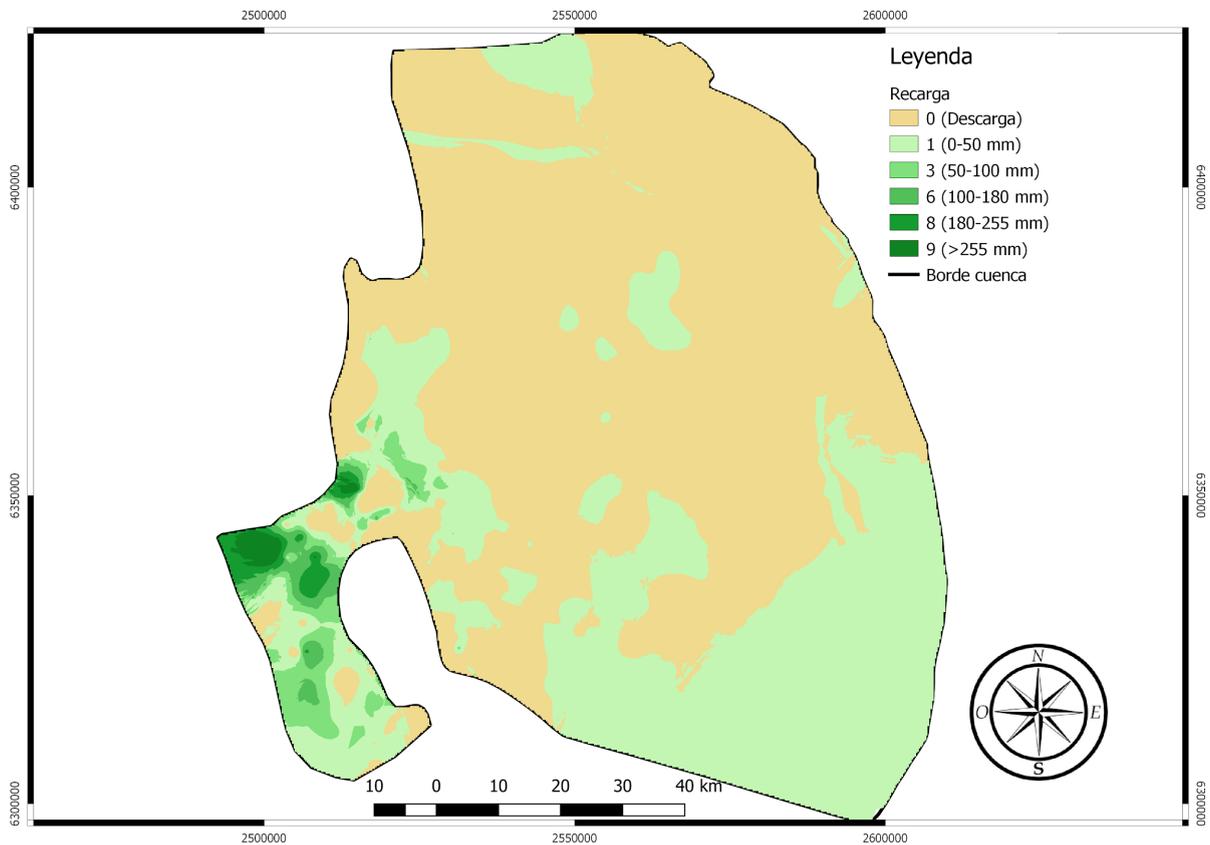
En el mapa de la Figura 9, se pueden observar recargas y descargas en el rango de -2468 mm a 395 mm, pero mayoritariamente este parámetro toma valores que van de 5 mm a -1 mm, los cuales se distribuyen sobre la zona de acuíferos confinados. Por otro lado, en la zona de acuífero libre se encuentran los valores más extremos tanto de recarga como de descarga.

Las áreas con mayor recarga de acuíferos se localizan en los sectores cercanos a la cordillera, donde los materiales depositados (sedimentos) son más gruesos y, por ende, las formaciones sedimentarias son más permeables; además, por allí circula casi la totalidad del agua que proviene del oeste (Figura 10).

La recarga de los acuíferos sedimentarios que componen las cuencas mendocinas se produce como consecuencia de las infiltraciones que ocurren a través de la superficie del suelo, ya sea este el lecho de los ríos, de los canales o las áreas regadas, y por las pérdidas en conductos subterráneos como lo son: las cañerías de agua potable y sanitaria, etc. También las lluvias podrían llegar a contribuir, aunque muy poco en Mendoza, ya que las precipitaciones en la llanura son pobres (Álvarez, et al., 2009)



**Figura 9:** Recarga y descarga del acuífero en milímetros. Los valores están clasificados en 9 clases de forma discreta, para una mejor visualización de los rangos predominantes del parámetro en cuestión



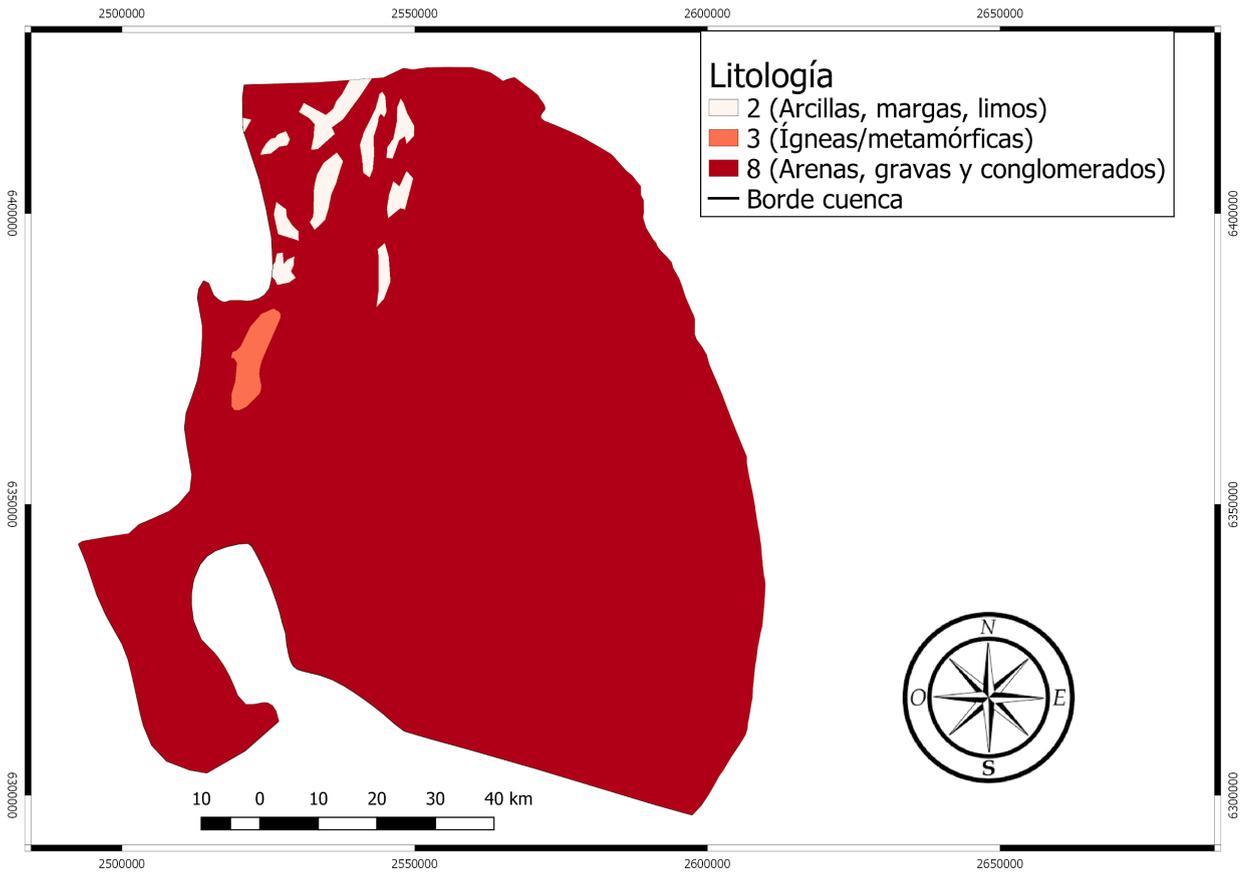
**Figura 10:** Valores de recarga del acuífero (en milímetros) reclasificados según la Tabla 1. En color marrón se encuentra la zona de descarga, la cual no es considerada para el modelo DRASTIC.

#### **4.2.1.3 Litología del Acuífero (A)**

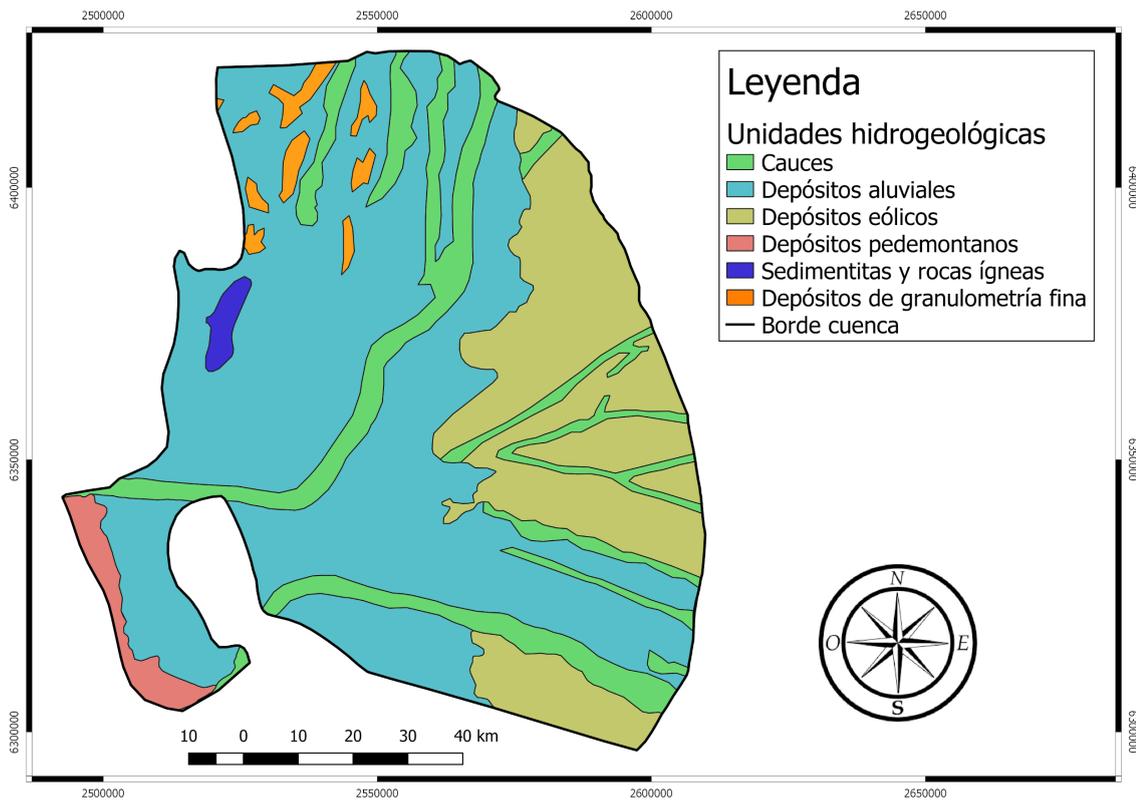
Los principales acuíferos se encuentran en la cubierta sedimentaria de edad neoterciaria, cuartaria y reciente. El sustrato está formado por sedimentos impermeables del Terciario Superior sobre los que se acumulan depósitos aluvionales y fluviales desde el mismo Terciario Superior hasta actuales (Hernández et al., 2012). Comprende capas filiformes o mantiformes, a veces amalgamadas, de gravas, gravillas y arenas permeables o muy permeables, con intercalaciones limo arcillosas. Localmente, tiene material piroclástico en variada proporción. Estos sedimentos se han acumulado en zonas pedemontanas (predominio de gravas), llanuras aluviales (predominio de arenas y gravillas), cubiertas medanosas (arenas y limos loésicos) o canales fluviales (gravas y arenas limpias) (Figura 12). Tanto los depósitos aluviales, eólicos, como los pedemontanos, tienen una elevada permeabilidad (Torres et al., 1996). A esta zona que ocupa la mayor parte de la cuenca Norte, se le hizo corresponder a la categoría “Arenas, gravas y conglomerados”, otorgándole un puntaje de “8” (Figura 11).

Por otro lado, hacia el noroeste del área de estudio, se encuentran depósitos de granulometría fina dentro de las zonas de barreales y salinas. Estos depósitos están conformados por limos y arcillas cuaternarios, por lo que se colocó un valor de “2” acorde a la puntuación de “Arcillas, margas y limos” en la clasificación DRASTIC. Hacia el oeste, hay una pequeña zona que se puede diferenciar en el mapa de la Figura 12, formada por sedimentitas y escasas rocas ígneas impermeables o poco permeables con poca agua mineralizada a la que se le ha atribuido un valor de “3”, correspondiente a “ígneas/metamórficas” en la Tabla 1.

Se deduce del mapa de la Figura 11, la gran vulnerabilidad que presenta el acuífero en cuanto al parámetro de análisis, ya que al ser elevada la permeabilidad de casi la totalidad de los depósitos que soportan el agua subterránea en la Cuenca Norte, los contaminantes se podrían transportarse con facilidad de un punto a otro.



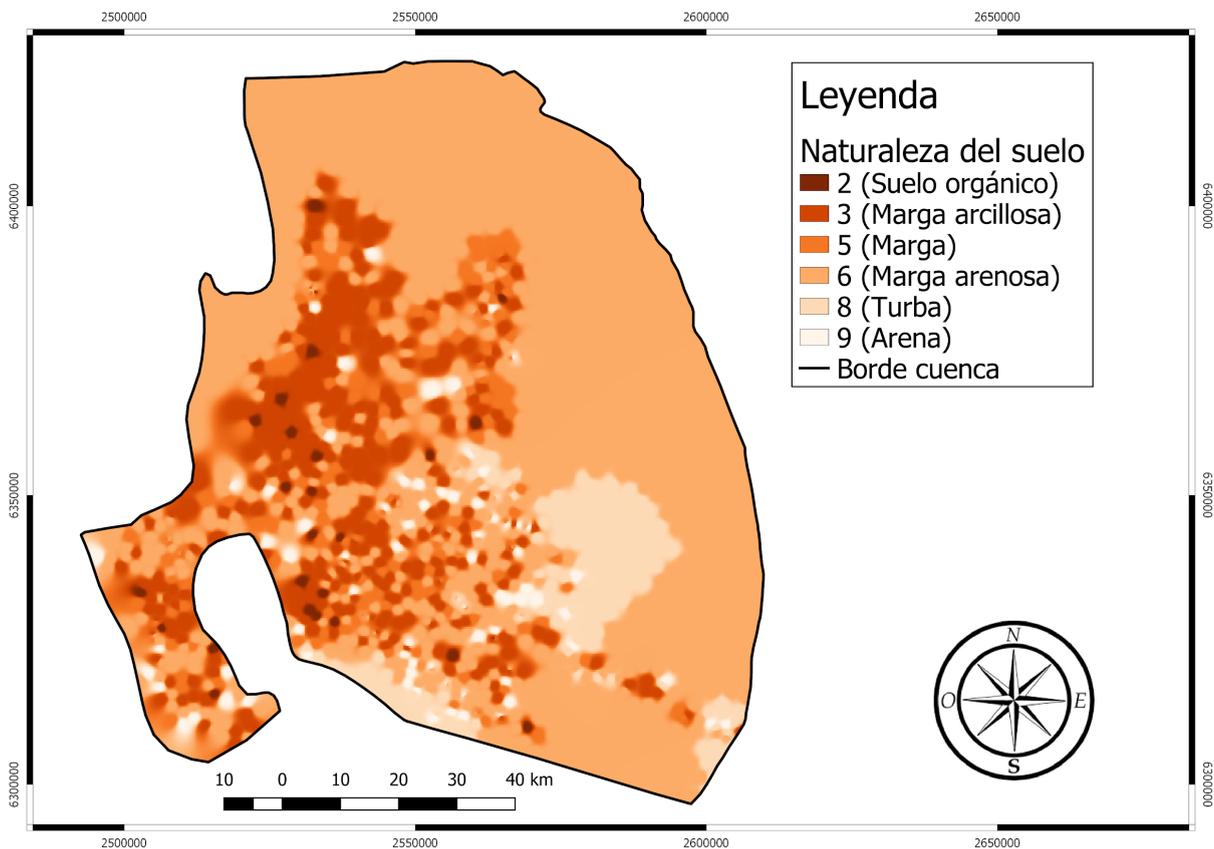
**Figura 11:** Litología del acuífero reclasificada según la Tabla 1.



**Figura 12:** Unidades Hidrogeológicas de la Cuenca Norte, cada una con una textura representativa a partir de las cuales se asignaron las clasificaciones del Índice DRASTIC. Fuente: Torres, A y Zambrano, J. (1996); SIGAM (s.f.).

#### 4.2.1.4 Naturaleza del Suelo (S)

A través del cálculo de las áreas de cada clase textural se pudo establecer que las texturas más gruesas, como lo son los suelos franco arenosos, arenosos finos y arenosos, ocupan alrededor del 72.6% del área total de la cuenca. A mayor tamaño de las partículas que conforman el suelo, mayor es la tasa de infiltración del contaminante, otorgándole así una gran vulnerabilidad a la zona de estudio (Figura 13).

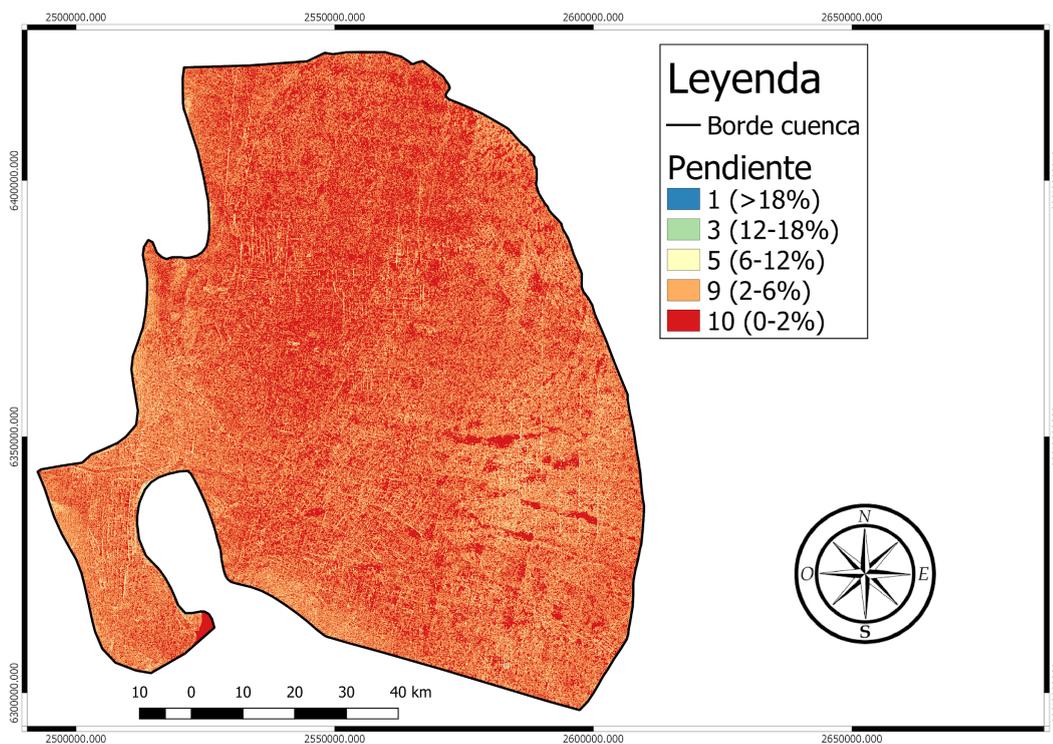


**Figura 13:** Valores de naturaleza del suelo reclasificados según la Tabla 1.

#### 4.2.1.5 Pendiente de la Superficie (T)

Dentro del área de estudio se encuentran valores de pendiente que van desde el 0% hasta el 30%. Los valores máximos de clasificación corresponden a las zonas de menor pendiente, mientras que las pendientes mayores contienen los valores de clasificación más bajos. Es importante destacar que en la cuenca predominan los valores de baja pendiente.

Un contaminante introducido en una pendiente pronunciada tiene menos posibilidades de infiltrarse en la superficie y es probable que fluya hacia abajo dejando la contaminación concentrada en la base de la pendiente cerca de una fuente de agua subterránea (Klug, 2009). Casi la totalidad de la cuenca (alrededor del 95%), está constituida por pendientes menores al 6%, elevando de esta manera su vulnerabilidad total.



**Figura 14:** Valores de pendiente del acuífero (en porcentaje) reclasificados según la Tabla 1.

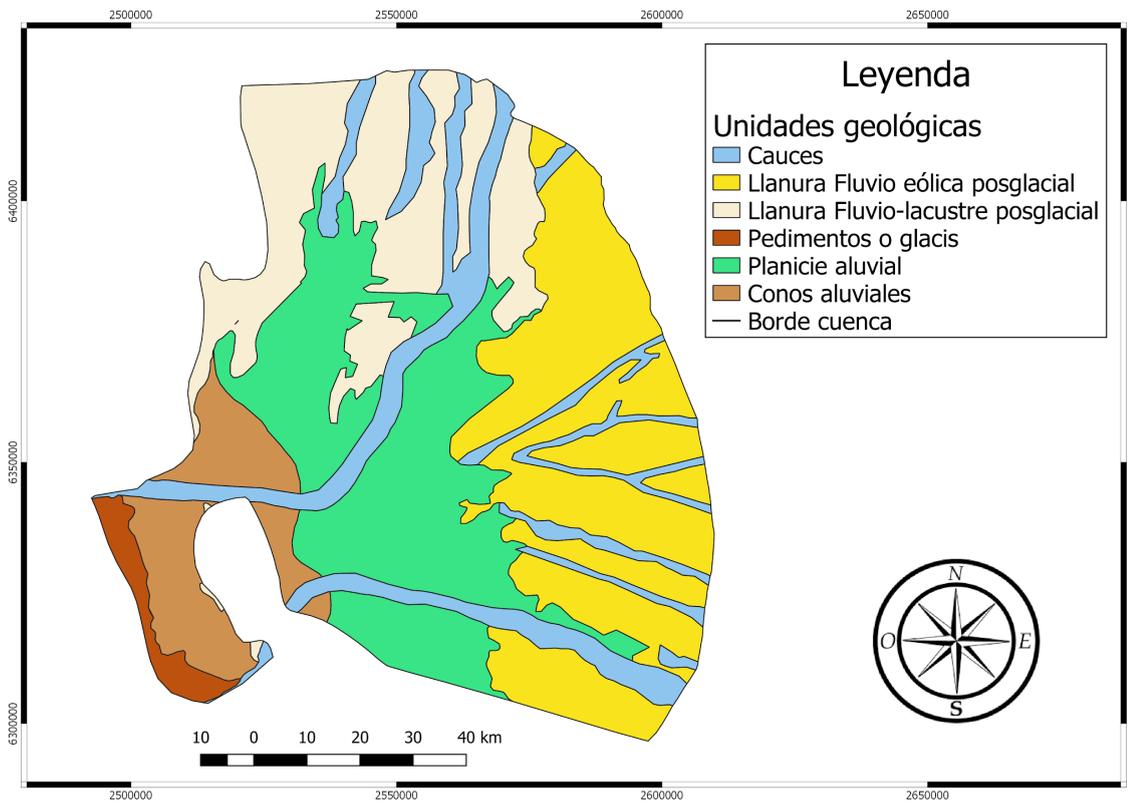
#### 4.2.1.6. Naturaleza de la Zona No Saturada (I)

La variación del gradiente topográfico, decreciente de oeste a este, ha regulado la distribución y deposición, clasificando el material transportado (Hernández et al., 2012). Así, se encuentran sedimentos de grano grueso en todo el desarrollo vertical de los conos, conformando los acuíferos que se comportan como libres (Sortino, 2013). Además, los depósitos aluviales que rellenan los cauces actuales y los paleocauces, contienen sedimentos de grano mediano como arenas y gravilla (Figura 15). Ambas zonas obtuvieron un valor de 8 según la clasificación del índice Drastic en la tabla 1 (Figura 16).

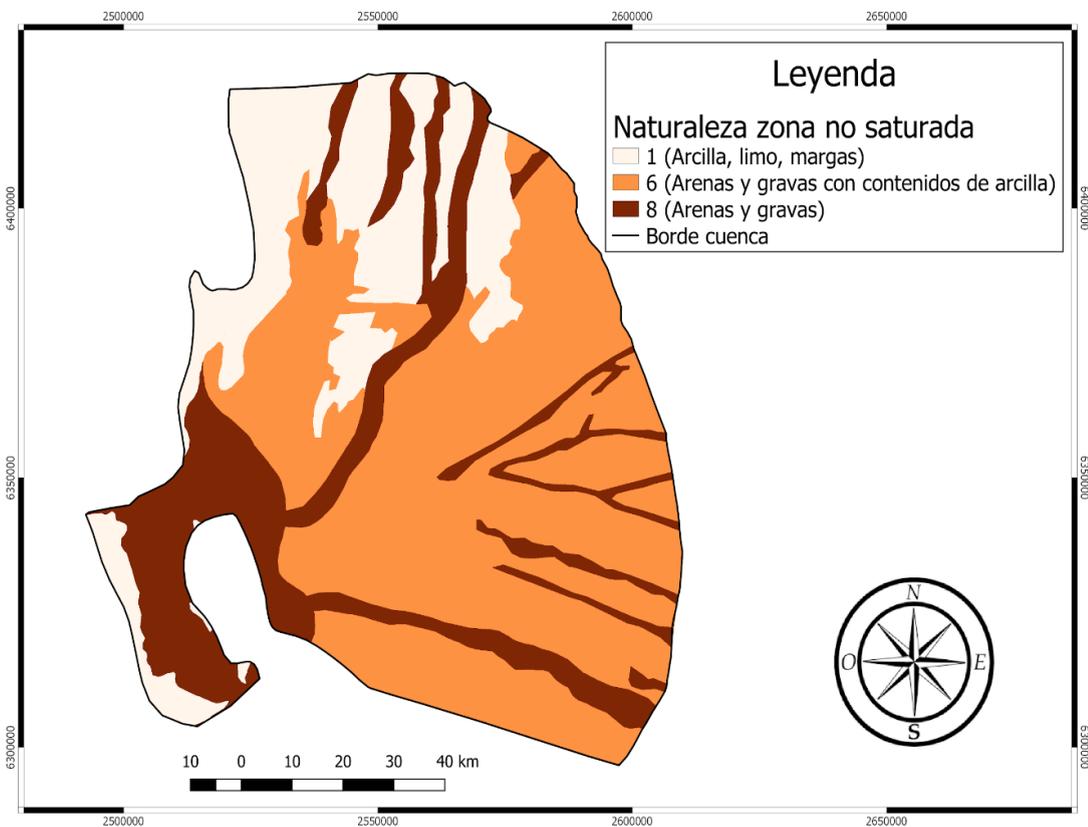
La culminación de los conos coincide con un quiebre topográfico del terreno y disminución del gradiente dando origen a la disminución granulométrica de los sedimentos que se produce como consecuencia del cambio de velocidad y pérdida de capacidad de transporte fluvial. A partir de ese quiebre de pendiente, los depósitos de sedimentos más finos dan origen a la existencia de formaciones menos permeables y a la aparición de un área de surgencia. Hacia el este, se

continúa la planicie con disminución del tamaño de los sedimentos, manteniéndose un cierto predominio de arenas finas sobre los intervalos limo-arcillosos. Estas últimas le confieren a los acuíferos características de semiconfinamiento y en algunos casos confinamientos lenticulares locales (Hernández, et al 2012). En estas zonas denominadas Llanura Fluvio eólica posglacial y Planicie aluvial con altas modificaciones antrópicas (oasis) (Figura 15), el contenido de “arenas finas sobre los intervalos limo-arcillosos” es una formación que no se registra en la clasificación DRASTIC. Una vez consultado con especialistas en geología, se ha decidido adjudicar una puntuación de 6, haciendo la equivalencia a “Arenas y gravas con contenido de arcilla” (Figura 16).

En el sector noroeste de la cuenca, se encuentra parte de la Llanura Fluvio-lacustre posglacial (Figura 15), cuyos depósitos son de texturas finas (limos y arcillas). En todas estas llanuras aluviales existen numerosas lagunas y barreales salinos. Por otro lado, hacia el sector suroeste hay una zona de pedimentos o glaciais. En geomorfología, un glacis o pedimento es un accidente geográfico que consta de una suave pendiente (menor del 10%) generalmente formada por la lixiviación y posterior deposición de las partículas finas de un cono de deyección o una ladera (Alain et al., 1985). Se le ha colocado a estas áreas el valor de “1” correspondiente a “Arcillas, limo, margas”, en la clasificación según la tabla 1 (Figura 16).



**Figura 15:** Unidades Geológicas de la Cuenca Norte, cada una con una textura representativa a partir de las cuales se asignaron las clasificaciones del Índice DRASTIC. Fuente: SIGAM (s.f.); Abraham, (1996).

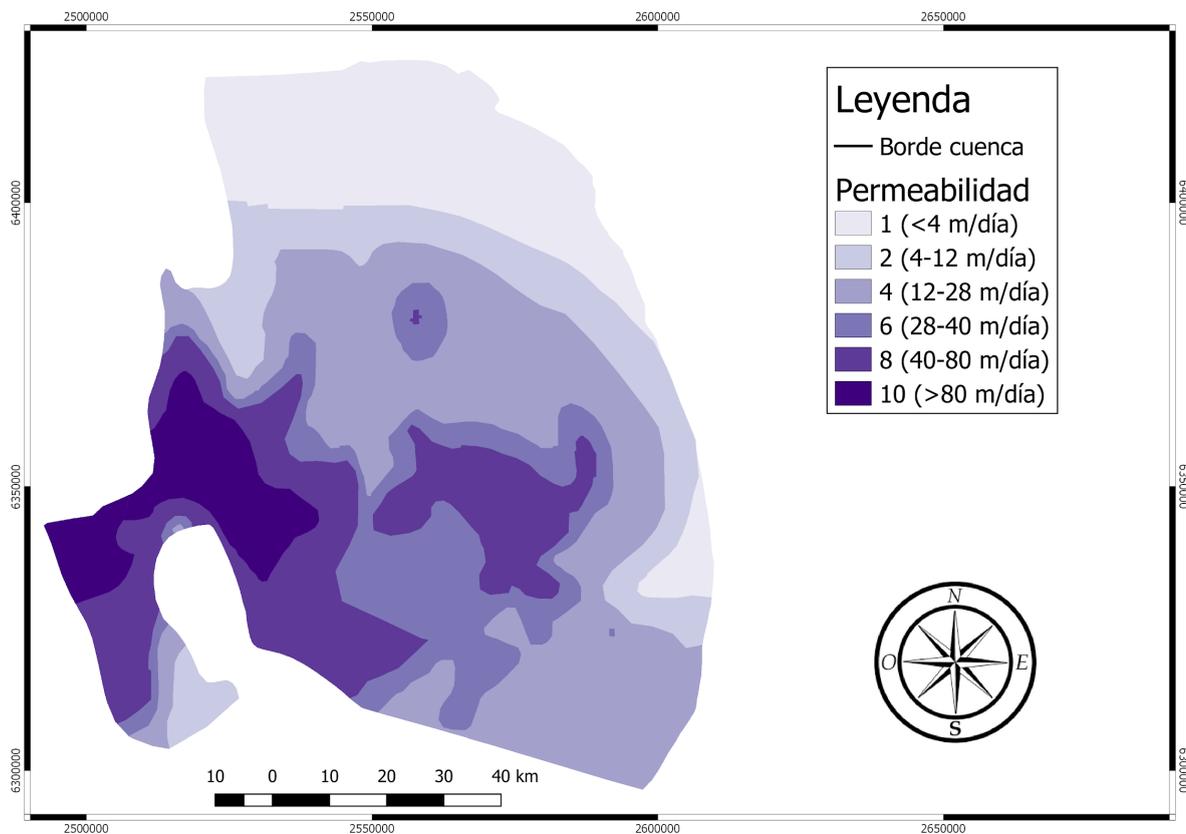


**Figura 16:** Naturaleza de la Zona No Saturada reclasificada según la Tabla 1.

#### 4.2.1.7. Conductividad Hidráulica del Acuífero (C):

La permeabilidad o conductividad hidráulica varía en el sentido de flujo del agua subterránea y acorde con los procesos de sedimentación (Sortino, 2013). La conductividad hidráulica es importante porque determina la velocidad de movimiento de un contaminante a través del acuífero desde el punto de contacto (Klug, 2009).

En general, las zonas ubicadas al oeste del acuífero, son las que se corresponden con mayor conductividad hidráulica. Los valores máximos se localizan en los alrededores de la parte media del abanico aluvial del río Mendoza, siendo la zona más vulnerable frente a la contaminación. Por otro lado, la permeabilidad al igual que la vulnerabilidad, va disminuyendo a medida que nos acercamos al este de la cuenca (Figura 17).



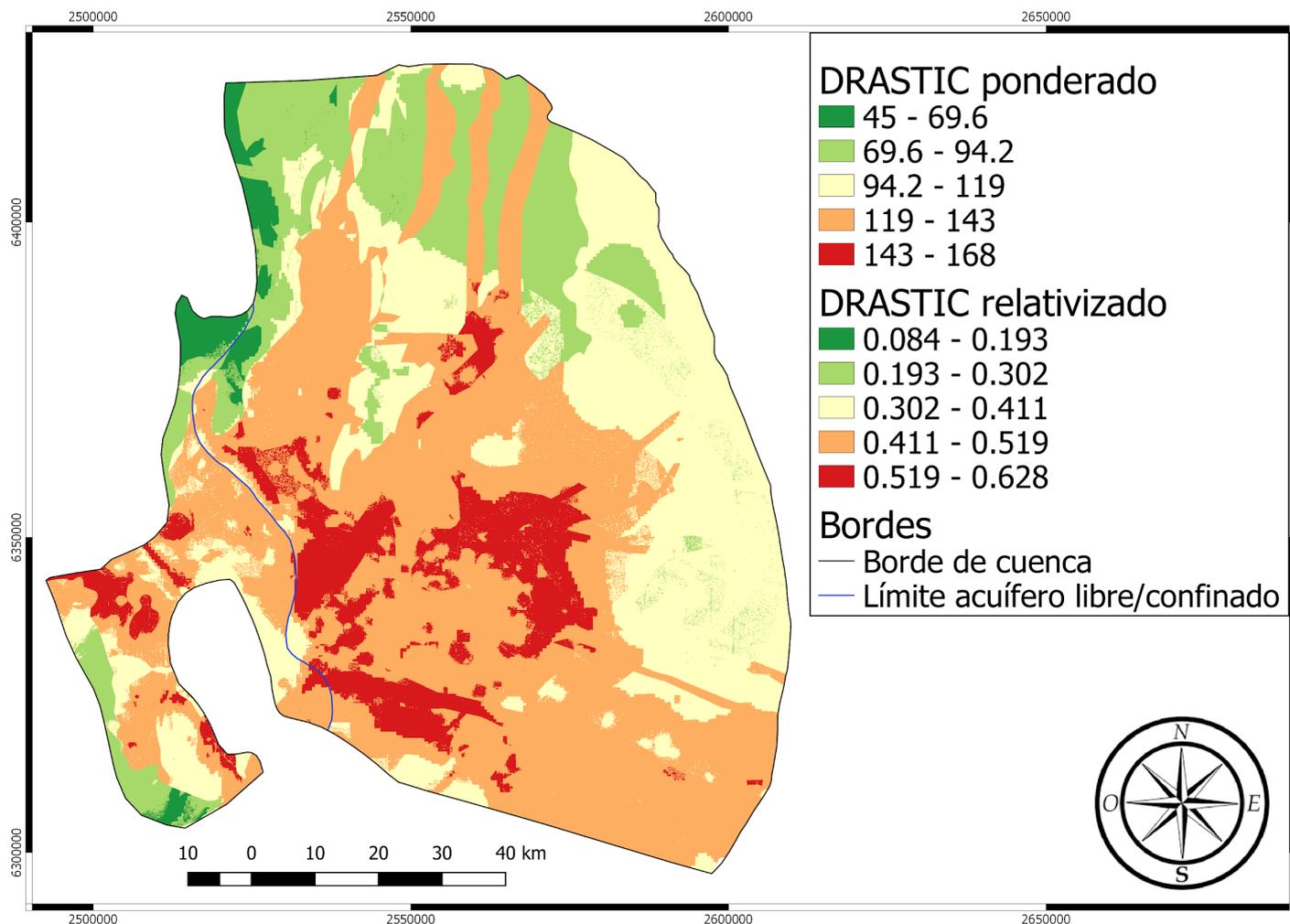
**Figura 17:** Valores de conductividad hidráulica del acuífero (en m/día) reclasificados según la Tabla 1.

#### 4.2.2. Índice DRASTIC

La Figura 18 comprende el mapa del Índice DRASTIC, cuya referencia muestra los valores ponderados (Ecuación 2) y relativizados en una escala de 0 a 1. El índice relativizado toma valores de 0,084 a 0,628 en la cuenca en estudio, considerando que 0 es la nula vulnerabilidad y 1 la máxima; mientras que el índice ponderado alcanza valores de 45 hasta 168, teniendo en cuenta que 26 es nula vulnerabilidad y 226 la máxima.

Pueden observarse en el mapa, las zonas de mayor vulnerabilidad del acuífero en colores rojo y anaranjado. Hacia el este del límite entre los acuíferos libre y confinado, la gran vulnerabilidad se explica teniendo en cuenta la presencia de valores de reclasificación altos en dos parámetros: la Profundidad del acuífero (D), con un elevado peso de ponderación, y el factor Conductividad hidráulica (C), que determina los parches rojos de mayor vulnerabilidad. El sector de color amarillo ubicado en la zona norte presenta una menor vulnerabilidad ya que el factor determinante es la Naturaleza de la zona no saturada (I), la cual obtuvo un menor valor de clasificación que las zonas anaranjadas contiguas. Por otro lado, en la zona de acuífero libre el parámetro de mayor influencia es el de Naturaleza de la zona no saturada (I) en conjunto con el de Recarga del acuífero (R), el cual genera los anillos de color rojo (Figura 18). La Recarga es de gran peso en la ponderación.

Hacia el norte de la cuenca y en una pequeña área ubicada en la zona de acuífero libre, se encuentran los sectores con menor vulnerabilidad (color verde). Esto se debe principalmente a sus características geomorfológicas, que dieron lugar a un valor de 1 en el parámetro Naturaleza de la Zona no Saturada. Hacia el este de la cuenca también se presentan valores de vulnerabilidad bajos, pero al ser menor la profundidad del acuífero, el sector adquiere un color amarillo (mayor vulnerabilidad).



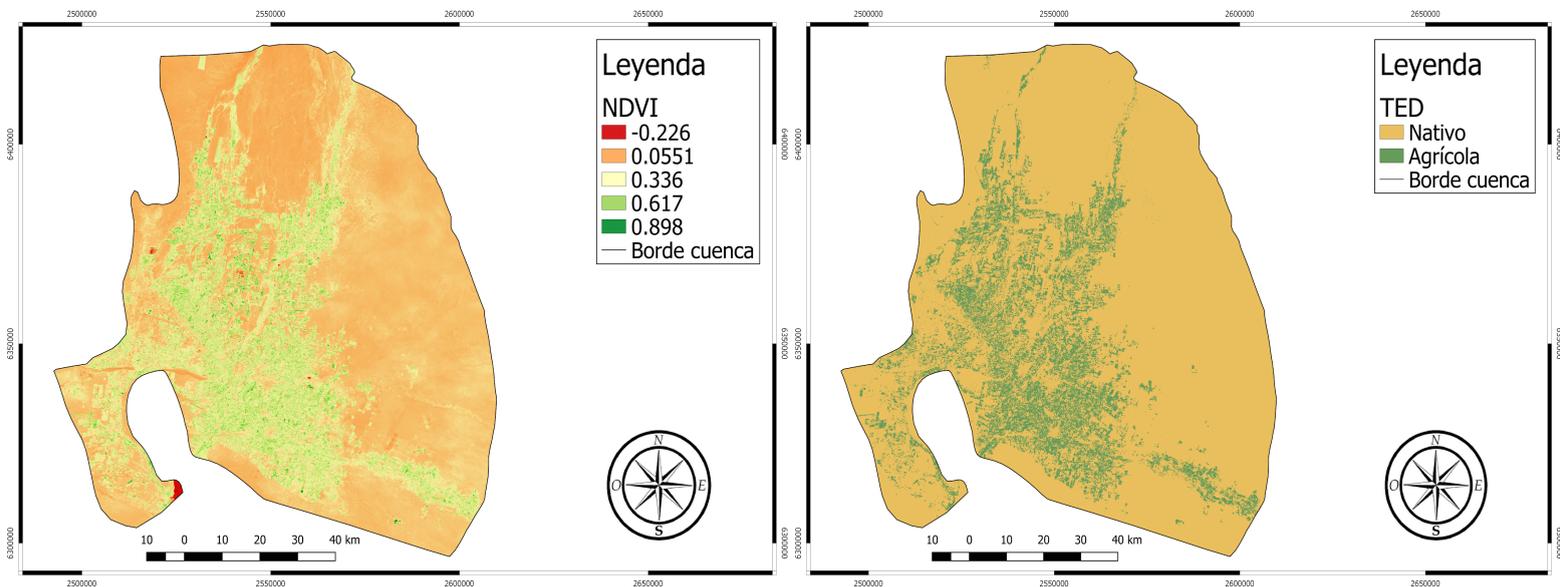
**Figura 18:** Vulnerabilidad intrínseca del acuífero. En la leyenda se pueden visualizar los rangos de valores del Índice DRASTIC ponderado y del Índice DRASTIC relativizado. (Se les ha aplicado una clasificación discreta de manera que sea posible visualizar las distintas áreas acorde a los niveles de vulnerabilidad con mayor claridad).

#### 4.2.3. Identificación de los Tipos de Ecosistemas Dominantes (TED)

En el mapa de NDVI de la Figura 19 puede observarse que los valores más altos del índice se encuentran al oeste de la cuenca, donde se localiza la mayor cantidad de emprendimientos agrícolas, mientras que los valores más bajos se concentran al este de la misma, en la cual predomina la vegetación nativa.

Posteriormente se obtuvo el mapa de Tipos de Ecosistemas Dominantes. Se distinguen en este dos tipos de TED: en color marrón el ecosistema dominante "Nativo" y en verde el ecosistema

dominante “Agrícola”. La mayor parte de la cuenca Norte, está representada por el TED Nativo (63%).



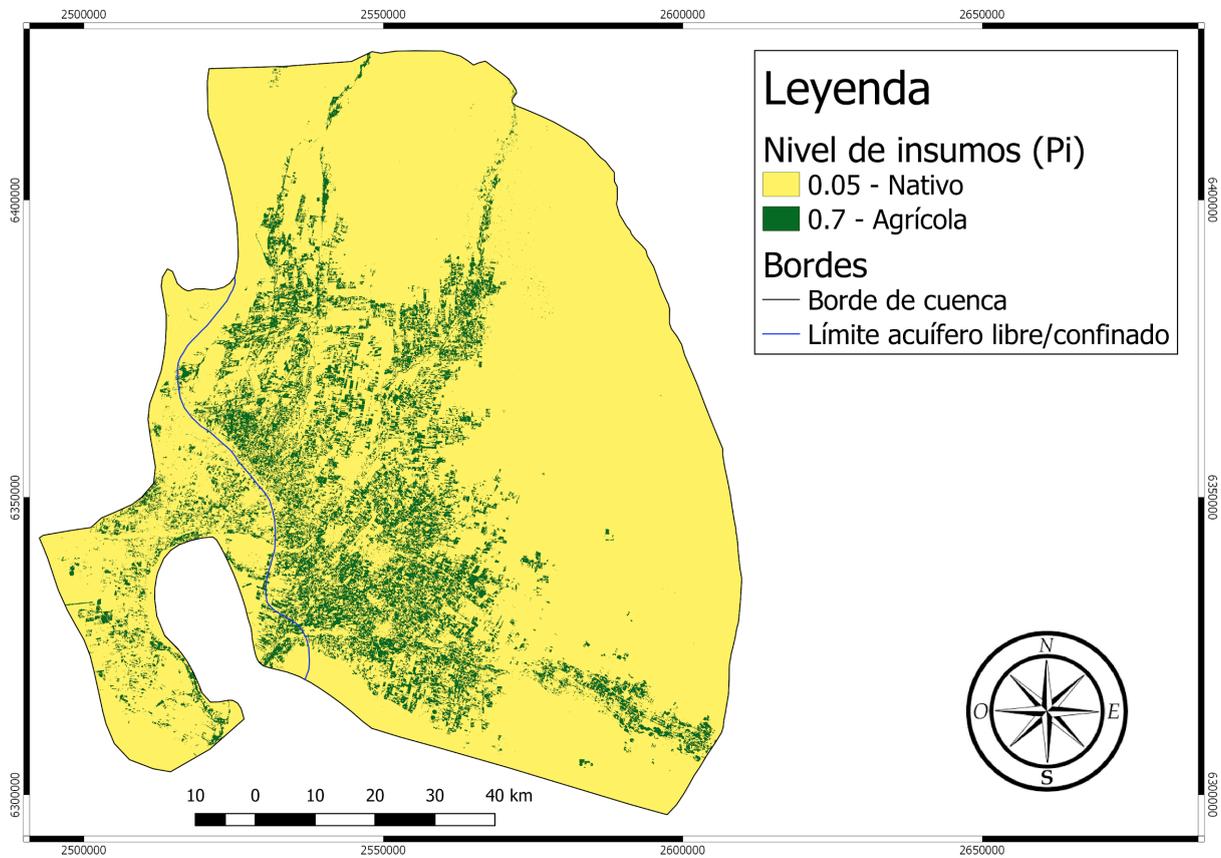
**Figura 19:** Índice de Vegetación Diferenciada Normalizada (NDVI) a la izquierda y Tipos de Ecosistemas Dominantes (TED) a la derecha.

#### 4.2.4. Nivel de insumos necesarios (Pi)

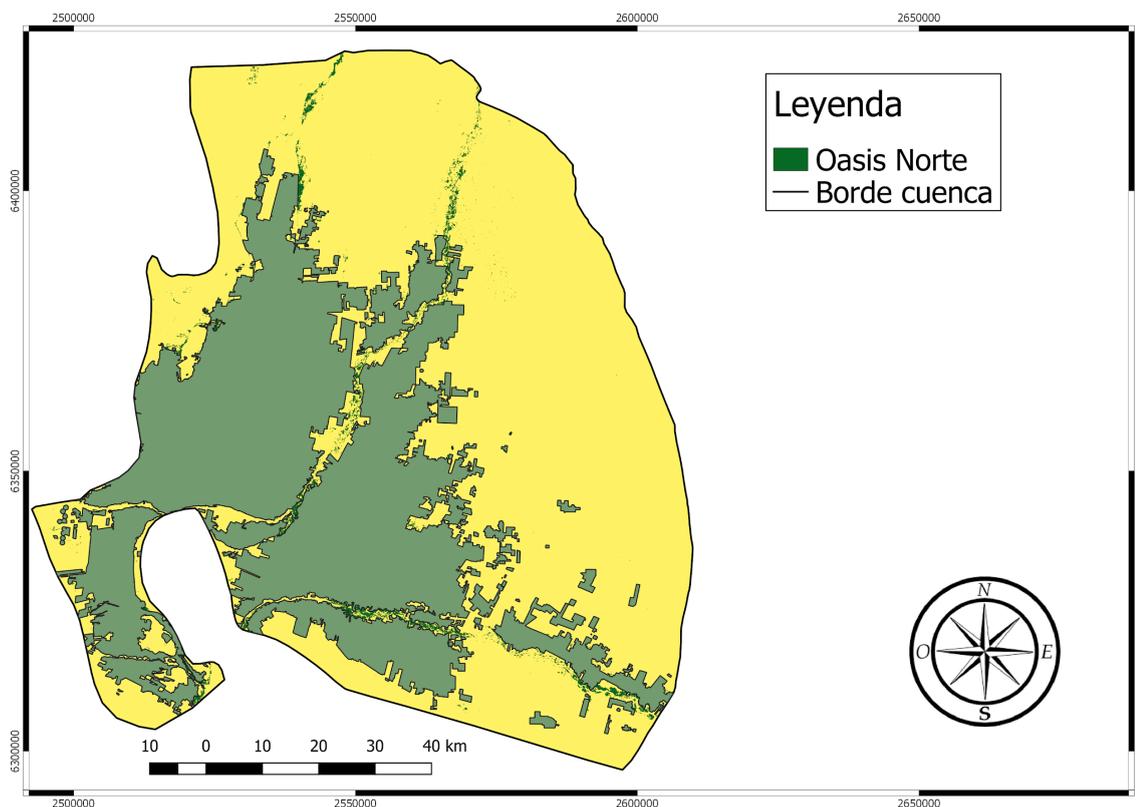
En el mapa de la Figura 20 se distinguen dos tipos de Uso/Cobertura, los cuales representan el rol de protección de la cobertura vegetal en función del nivel de insumos (agroquímicos) necesarios para el desarrollo de la actividad productiva (Pi). En color verde se distinguen las zonas de mayor uso de insumos correspondientes al uso/cobertura Agrícola, a las cuales se le asignó un Pi de 70%. Las zonas de insumos mínimos o nulos se visualizan en color amarillo y corresponden al uso/cobertura Nativo; Se utilizó en este caso un Pi de 5%.

Las áreas de cultivos constituyen el oasis dentro de la cuenca Norte (Figura 21). Se puede observar la distribución de las parcelas sobre las zonas de depósitos aluviales y cauces fluviales (Figura 12), evitando la zona de salinas y barriales (Figura 16). A su vez, hay una disposición preferencial de las parcelas hacia el este del límite entre el acuífero libre y confinado. Esta es la

zona de quiebre topográfico del terreno, en la cual al disminuir la granulometría se generan suelos más fértiles y aptos para el cultivo.



**Figura 20:** Tipos de Uso/Cobertura en función del nivel de insumos necesarios para llevar a cabo la actividad productiva.



**Figura 21:** Oasis Norte (color verde) dentro del área de estudio.

#### 4.2.5. Función Ecosistémica: Protección de Acuíferos por Cobertura

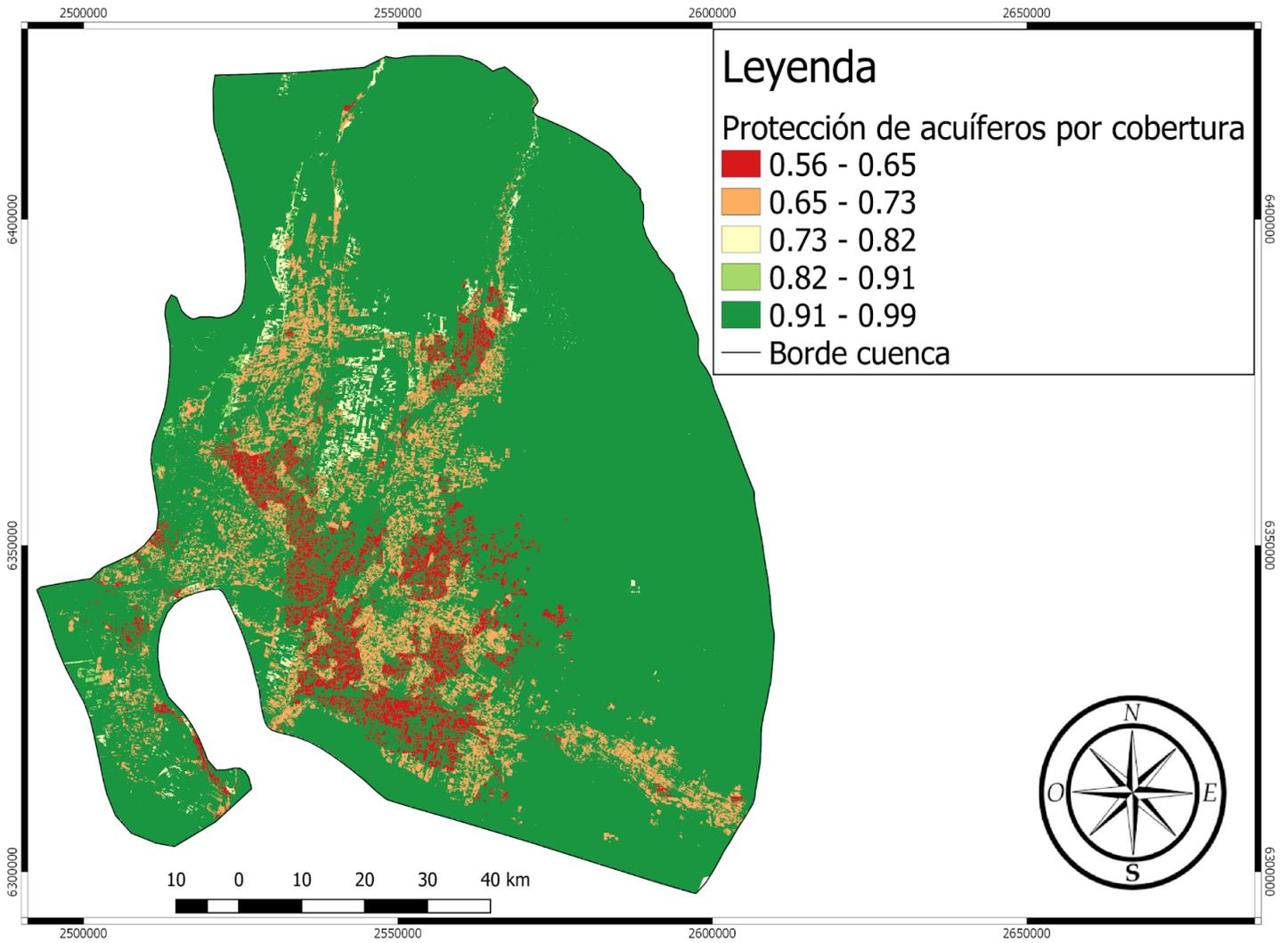
Se puede observar en la Figura 22, la zona que presenta los mayores valores de la función PAC (0,91 a 0,99) en color verde oscuro. La misma comprende el área donde el tipo de cobertura es Nativa. Por el contrario, la menor protección por parte de la cobertura vegetal (0,56 a 0,65) en conjunto con el nivel de protección del rango 0,65 a 0,73 (color naranja), se encuentran en su totalidad dentro del TED Agrícola, a pesar de que hayan zonas de elevada vulnerabilidad intrínseca ocupando áreas fuera de este Tipo de Uso/Cobertura (Figura 23). Por lo anterior se puede visualizar la gran influencia que tiene el factor Pi, en la distribución de los valores de la función PAC en la Cuenca Norte. Dicho de otra manera, los Tipos de Uso/Cobertura en función de los niveles de insumos necesarios para llevar a cabo la actividad productiva condicionan en gran manera la protección que brinda el ecosistema sobre el acuífero.

Dentro del TED Agrícola, se ve una clara incidencia de la Vulnerabilidad intrínseca del acuífero, en la diferenciación de áreas donde el índice PAC abarca los distintos rangos. Las distintas subáreas

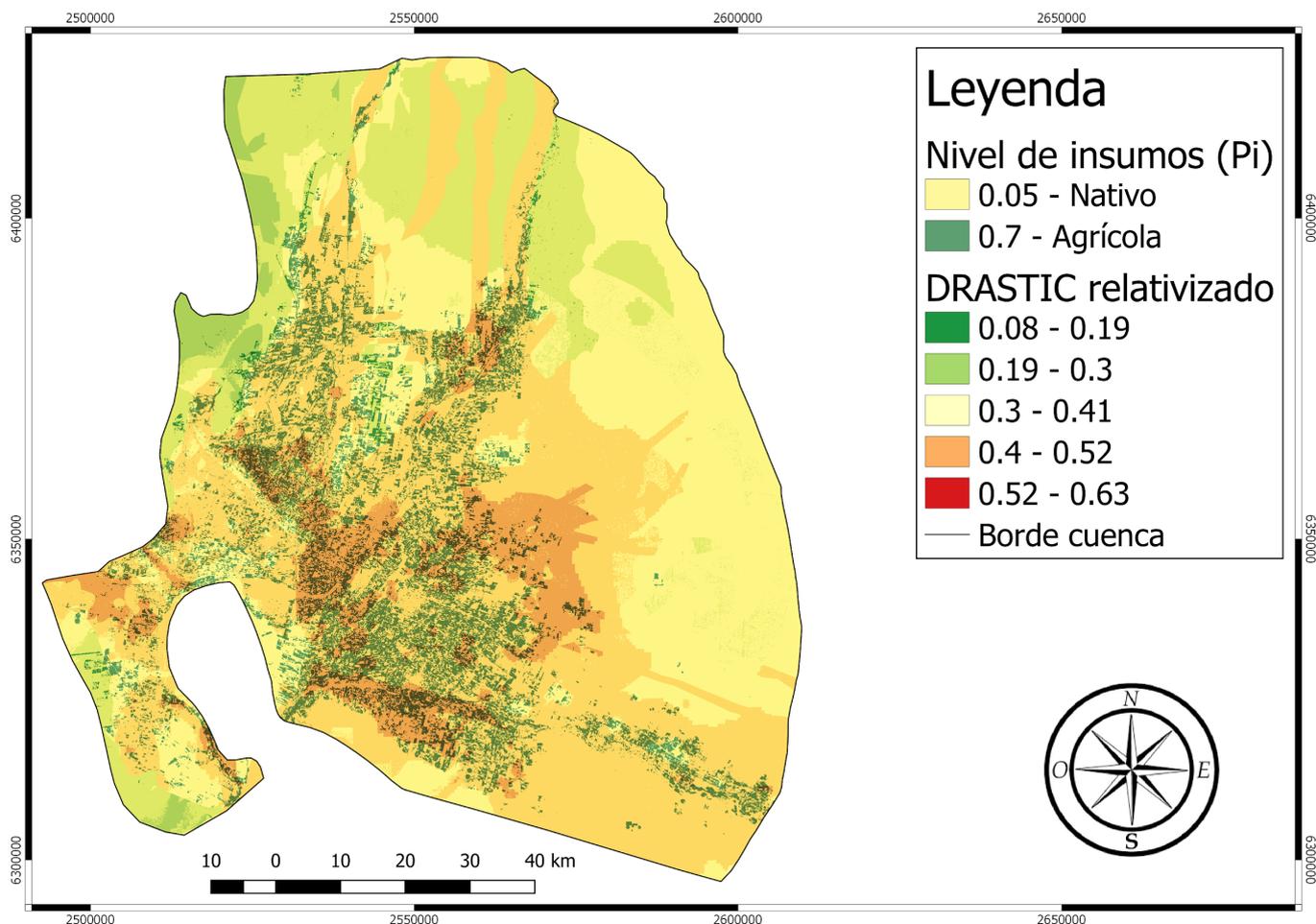
que están delimitadas dentro de este tipo de cobertura, coinciden con las del mapa del índice DRASTIC. Así, el sector amarillo (0,73 - 0,82) en el mapa de la función PAC, se corresponde con el área de vulnerabilidad con valores menores a 0,411 en el Índice DRASTIC Relativizado, el sector naranja (0,65 a 0,73) se encuentra sobre las áreas del mismo color en el mapa del Índice DRASTIC ( $>0,411$  y  $<0,519$ ), mientras que la zona de menor protección se ajusta al área de mayor vulnerabilidad.

Aunque los valores más altos obtenidos en el Índice DRASTIC Relativizado (0,5 a 0,6) presentan una vulnerabilidad cercana a la media (en una escala del 0 al 1), casi la totalidad de las zonas de mayor vulnerabilidad se encuentran dentro del TED Agrícola. Esta situación llama a reflexionar acerca del riesgo que representan los emprendimientos agrarios actuales respecto al agua subterránea y la necesidad de su regulación.

Partiendo desde la base de que cada cobertura vegetal presenta una determinada capacidad de protección (en función del nivel de agroquímicos que requiera para el desarrollo de la actividad productiva) y que dicha protección cobra mayor relevancia en los píxeles más vulnerables, en el mapa de la Figura 23 se logra visualizar las zonas en las cuales la capacidad de protección del ecosistema toma mayor relevancia. La misma se encuentra sobre el área de Uso/Cobertura Nativo, en los píxeles donde el riesgo intrínseco del acuífero a ser contaminado es mayor. La ausencia de aplicación de pesticidas y fertilizantes previene al agua subterránea de una potencial contaminación.



**Figura 22:** Protección de Acuíferos por Cobertura vegetal.



**Figura 23:** índice DRASTIC solapado con el mapa del factor Pi.

## 5. CONCLUSIONES FINALES

Se puede decir en base a los resultados encontrados, que existen diferencias en los valores de la función PAC dentro del área de estudio. Por lo tanto, se ratifica la hipótesis de que la vulnerabilidad de acuíferos y su protección por parte de la cobertura vegetal varían espacialmente en la cuenca Norte de Mendoza.

La cuenca Norte ocupa, total o parcialmente, tierras que pertenecen a los departamentos de Capital, Guaymallén, Godoy Cruz, Lavalle, Las Heras, Luján de Cuyo, Maipú, Rivadavia, Junín, Santa Rosa, La Paz y San Martín, los cuales forman parte de lo que se denomina como el Oasis Norte en la provincia de Mendoza. En esta zona radica el 78% de la población mendocina y el

más importante conjunto de industrias. Por otro lado, el agua contenida en el acuífero de esta cuenca es la reserva más importante de agua que posee el oasis para prevenir problemas de oferta del recurso; incluso almacena el mayor volumen de agua subterránea de todas las cuencas que se encuentran en la provincia. El recurso hídrico en Mendoza es el motor del sector primario y por ende, de la economía de la región, y ya que en la actualidad dicha provincia se encuentra en estado permanente de emergencia hídrica, es de fundamental importancia mantener la calidad de las aguas subterráneas como reservorio.

Aunque la vegetación natural está desarrollando un papel de suma relevancia en las zonas de mayor vulnerabilidad, es necesario recordar que casi la totalidad de las áreas más vulnerables se encuentran dentro del TED Agrícola. Disminuir la cantidad de plaguicidas y fertilizantes, se traduce directamente en un aumento de la protección que brinda la cobertura vegetal al acuífero. Debido a lo mencionado con anterioridad, es substancial poder regular las actividades actuales, incentivando prácticas agrícolas compatibles con un desarrollo sustentable, pero dado que solo el 15,1% del área total cultivada en Mendoza sigue un tipo de producción orgánica (SENASA, 2018), esto se trata de un gran desafío.

Una de las metas principales de este trabajo es la de brindar soporte técnico a los gestores de la ordenación del territorio competentes en la provincia de Mendoza, dependientes de la Secretaría de Ambiente y Ordenamiento Territorial (SAyOT). Esto sería con el fin de que puedan tomar las medidas necesarias y hacer diferentes propuestas de zonificaciones territoriales orientadas a la conservación del recurso hídrico. Una expansión agrícola con formas de manejo poco amigables con el ambiente o la expansión de la matriz productiva con actividades contaminantes, podrían alterar la calidad del agua en la totalidad de la cuenca.

A su vez, la información generada sirve para ampliar el conocimiento de la cuenca Norte y el agua subterránea de la provincia de Mendoza bajo la mirada de servicios y funciones ecosistémicas. Se espera que este conocimiento sirva de aporte a la concientización de la población, encontrándose la presente tesina disponible en medios como la Biblioteca virtual (<http://bdigital.uncu.edu.ar/>) y física de la Universidad Nacional de Cuyo, y eventualmente también pueda ser utilizada por organismos que velen por la protección del agua subterránea como el Departamento General de Irrigación (DGI), el Ente Provincial del Agua y Saneamiento (EPAS), y la dicha Secretaria de

Ambiente y Ordenamiento Territorial (SAyOT),

Como propuesta a futuro, y aprovechando que el presente trabajo tiene mucho contenido visual, se podría evaluar la posibilidad de concertar charlas informativas con los productores del Oasis Norte, actores sociales influyentes en la dinámica y las propiedades del agua, que a su vez utilizan directamente este recurso y se benefician con los servicios ambientales que provienen del mismo.

Sería interesante la complementación del trabajo ya sea con el estudio de otras fuentes de contaminación, considerando que el Oasis Norte posee la mayor cantidad de industrias de toda la provincia, o continuar con el análisis propuesto en el protocolo ECOSER en cuanto a los “Flujos de Funciones (FE) y Servicios Ecosistémicos (SE)”, su interacción y su captura por la sociedad, así como la “Vulnerabilidad Socio-Ecológica (VSE)” bajo distintos escenarios de pérdida de SE.

# BIBLIOGRAFÍA

ABRAHAM, E.M. (1996). Mapa geomorfológico Mendoza sector Sur. Recuperado de: <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/ladyot/catalogo/cdandes/g0402.htm>

ALAIN, F. y Jean-François, R. (1985). *Diccionario de Geología*. (4ta. ed.). [Definición de Glacis].

ALLER, L., Bennett, T., Lehr, J. y Petty, R. (1985). A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic setting. *U.S. EPA Rep.*, 600, 157.

ALLER, L., Bennet, T., Lher, J. y Petty, R. (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic setting. *U.S. EPA Rep.*, 600, 2-85.

ALVAREZ, A., Drovandi, A., Hernández, J., Hernández, R., Martinis, N., Maza, J., Mirábile, C., Morábito, J., Salatino, S. y Vargas, A. (2009). El agua en Mendoza y su problemática ambiental.

BALVANERA, P. y COTLER, H. (2007). Los servicios ecosistémicos y la toma de decisiones: retos y perspectivas. *Gaceta Ecológica*, 84-85, 117-123.

BARRAL, M.P. (2016). Tutorial para el mapeo de funciones ecosistémicas y servicios ecosistémicos. Protocolo ECOSER.

BETANCUR, T., Bocanegra, E., Manzano, M., Custodio, E. y Cardoso da Silva, G. (2013). Acerca del estado del conocimiento respecto a las interacciones aguas subterráneas-humedales-bienestar humano en Iberoamérica y la Península Ibérica. *Temas Actuales de Hidrología Subterránea*, 254-262.

BOYD, J. y Banzhaf, S. (2007). What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*, 63, 616-626.

BURGESS, T.M. y Webster, R. (1980). Optimal Interpolation and Isarithmic Mapping of Soil Properties: I. The Variogram and Punctual Kriging. *Journal of Soil Science*, 31, 315-331.

CARPENTER, S. R., Bennett, E. M. y Peterson, G. D. (2006). Scenarios for ecosystem services: an overview. *Ecology and Society*, 11(1), 29. Recuperado de: <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art29/>

CHOPRA, K., Leemans, R., Kumar, P. y Simons, H. (2005). *Ecosystems and Human Well-Being: Policy Responses. Volume 3*. Washington, D.C., Estados Unidos: Island Press.

COSTANZA, R., D'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B.,...Van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 253-260.

DAILY, G.C., Polasky, S., Goldstein, J., Kareiva, P.M., Harold A Mooney,... Shallenberger, R. (2009). Ecosystem services in decision making: time to deliver. *Front Ecol Environ*, 7(1), 21-28.

DAILY, G.C. (1997). *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, D.C., Estados Unidos: Island Press.

DE GROOT, R.S. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41, 393–408.

DE GROOT, R.S., Fisher, B. y Christie, M. (2010). Integrating the ecological and economic dimensions in biodiversity and ecosystem service valuation. En P. Kumar, (Ed.), *The Economics of Ecosystems and Biodiversity. Ecological and Economic Foundations* (pp. 1-40). Londres, Inglaterra y Washington D.C., Estados Unidos: Earthscan.

DEPARTAMENTO GENERAL DE IRRIGACIÓN. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Nación, Gobierno de Mendoza. (2006). Plan director del río Mendoza. Recuperado de: [http://produccion.jujuy.gob.ar/wp-content/uploads/sites/18/2016/09/PlaNdirectorMza\\_octubre06.pdf](http://produccion.jujuy.gob.ar/wp-content/uploads/sites/18/2016/09/PlaNdirectorMza_octubre06.pdf)

DEPARTAMENTO GENERAL DE IRRIGACIÓN. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Nación, Gobierno de Mendoza. (2006). Recuperado de: [http://aquabook.agua.gob.ar/files/upload/contenidos/10\\_3/REDDERIEGO\\_MENDOZA-FAO.pdf](http://aquabook.agua.gob.ar/files/upload/contenidos/10_3/REDDERIEGO_MENDOZA-FAO.pdf).

FISHER, B., Kerry Turner, R. y Morling, P. (2009). Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 68(3), 643–653.

FOSTER, S. (1987). Fundamental Concept in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy. En W. Van Duijvenbooden y H. G. Van Waegeningh, (Eds.), *Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutions* (pp. 69-86). La Haya, Países Bajos: TNO Committee on Hydrogeological Research.

FRANK, F. (2015). Prólogo. En P. Laterra, E. G. Jobbágy y J. M. Paruelo, (Eds.), *Valoración de servicios ecosistémicos: conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial* (pp. 359-390). Buenos Aires, Argentina: Ediciones INTA.

GIS Geography. (23 de febrero de 2018). Semi-Variogram: Nugget, Range and Sill. Recuperado de: <https://gisgeography.com/semi-variogram-nugget-range-sill/>.

GOOGLE. (s.f.). [Mapa de Mendoza, Argentina en Google maps]. Recuperado el 14 de Mayo, 2019, de: <https://www.google.com.ar/maps/place/Mendoza/@-34.8456375,-70.2570554,665736m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x9679745b5dd5fffd:0x902586f1d047824!8m2!3d-32.8896247!4d-68.8526867>

HAINES-YOUNG, R. y Potschin, M. (2010). The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being. En D. G. Raffaelli, y C. L. J. Frid (Eds.), *Ecosystem Ecology: A New Synthesis* (pp. 110- 139). New York, United States: Ecological Reviews. Recuperado de: [http://www.nottingham.ac.uk/CEM/pdf/HainesYoung&Potschin\\_2010.pdf](http://www.nottingham.ac.uk/CEM/pdf/HainesYoung&Potschin_2010.pdf).

HASSAN, R., Scholes, R. y Ash, N. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends*. Washington, D.C., Estados Unidos: Island Press.

HASSIG, N.L., Wilson, J.E., Gilbert, R.O., Pulsipher, B.A, Nuffer, L.L., Murray, C.J., ... Dowson, S.T. (2010). Kriging: Calculating the experimental variogram. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington: *Visual Sample Plan Version 6.0 User's Guide*. Recuperado de: [https://vsp.pnnl.gov/help/Vsample/Kriging\\_Variogram.htm](https://vsp.pnnl.gov/help/Vsample/Kriging_Variogram.htm)

HERNÁNDEZ, J. y Martinis, N., (2006). Particularidades de las cuencas hidrogeológicas explotadas con fines de riego en la provincia de Mendoza. Recuperado de: <https://www.ina.gov.ar/legacy/pdf/CRA-IIIFERTI/CRA-RYD-9-Hernandez.pdf>.

HERNÁNDEZ, J., Martinis, N. y Fornero, L. (2012). Modelación hidrológica de la cuenca norte de mendoza. Recuperado de: <https://www.ina.gov.ar/legacy/pdf/CRA-HSub-Modelacion-Cca-Norte-Mendozal.pdf>.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y CENSOS. (2010). Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas (Serie B N° 2. Tomo 1). Recuperado de: [https://www.indec.gov.ar/ftp/cuadros/poblacion/censo2010\\_tomo1.pdf](https://www.indec.gov.ar/ftp/cuadros/poblacion/censo2010_tomo1.pdf)

KEENEY, D.R. (1986). Sources of nitrate to groundwater. *Criteria Review Environmental Control*, 16(3), 257-304.

KLUG, J. (2009). Modeling the Risk of Groundwater Contamination Using DRASTIC and Geographic Information Systems in Houston County, Minnesota. *Papers in Resource Analysis*, 11, 12.

LATERRA, P., Barral, P., Carmona, A. y Nahuelhual, L. (2015). ECOSER: protocolo colaborativo de evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos y vulnerabilidad socio-ecológica para el ordenamiento territorial. Recuperado de: [https://inta.gov.ar/sites/default/files/inta\\_pt99\\_protocolo\\_colaborativo\\_de\\_evaluacion\\_y\\_mapeo\\_de\\_servicios\\_ecosistemicos\\_y\\_vulnerabilidad\\_socio-ecologica\\_para\\_el\\_ordenamiento\\_territorial.pdf](https://inta.gov.ar/sites/default/files/inta_pt99_protocolo_colaborativo_de_evaluacion_y_mapeo_de_servicios_ecosistemicos_y_vulnerabilidad_socio-ecologica_para_el_ordenamiento_territorial.pdf)

LATERRA, P., Castellarini, F. y Orúe, E. (2011). Ecoser: Un protocolo para la evaluación biofísica de servicios ecosistémicos y la integración con su valor social. En P. Laterra, E. G. Jobbágy y J. M. Paruelo, (Eds.), *Valoración de servicios ecosistémicos: conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial* (pp. 359-390). Buenos Aires, Argentina: Ediciones INTA. Recuperado de:

[https://inta.gov.ar/sites/default/files/script-tmp-inta\\_\\_valoracion\\_de\\_servicios\\_ecosistemicos.pdf](https://inta.gov.ar/sites/default/files/script-tmp-inta__valoracion_de_servicios_ecosistemicos.pdf)

LATERRA, P., Orúe, M., Booman, G., (2012). Spatial complexity and ecosystem services in rural landscapes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 154, 56-67.

LJUBOW N.G., González, A. y Mardones, M. (2003). Evaluación de la vulnerabilidad natural del acuífero freático en la cuenca del río Laja, centro-sur de Chile. *Revista geológica Chile*, 30(1), 3-22.

LUCK, G.W., Harrington, R., Harrison, P.A., Kremen, C. Berry, P.M., Bugter, R.,...Zobel, M. (2009). Quantifying the Contribution of Organisms to the Provision of Ecosystem Services. *BioScience* 59(3), 223-235.

MARTÍNEZ, M., Delgado, P. y Fabregat, V. (1998). Aplicación del Método DRASTIC para la evaluación del riesgo de afección a las aguas subterráneas por una obra lineal. En: J. Samper, A. Sahuquillo, J.E. Capilla, y J.J. Gómez Hernández, (Eds.), *Jornadas sobre la contaminación de aguas subterráneas: un problema pendiente* (pp. 413-420). Valencia, España: Valencia IH-GE.

MASTRANTONIO, L. y Pérez, M. (s.f). Evaluación de funciones de edafotransferencia para suelos de Mendoza” [Inédito].

MAYNARD, S., James, D. y Davidson, A. (2010). The development of an ecosystem services framework for South East Queensland. *Environmental Management*, 45(5), 881–895.

MELIAN, R., Myrlian, N., Gouriev, A., Moraru, C. y Radstake, F. (1999). Groundwater quality and rural drinking-water supplies in the Republic of Moldova. *Hydrogeology Journal*, 7(2), 188-196.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (MEA). (2003). *Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment*. Washington D.C., EE.UU: World Resources Institute.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (MEA). (2005). *Ecosystems and Human Well-being: General Synthesis*. Washington D.C., EE.UU: World Resources Institute.

MOONEY H.A. y Ehrlich, P.R. (1987). Ecosystem services: a fragmentary history. En G.C. Daily, (Ed.), *Nature's services: Societal dependence on Natural Ecosystems* (pp. 11-22). Washington, D.C., Estados Unidos: Island Press.

PACIFIC NORTHWEST NATIONAL LABORATORY (PNNL). (2002). Kriging: Fitting a variogram model. *Visual Sample Plan*. Recuperado de: [https://vsp.pnnl.gov/help/vsample/Kriging\\_Variogram\\_Model.htm](https://vsp.pnnl.gov/help/vsample/Kriging_Variogram_Model.htm)

PARUELO, J.M. (2010). Valoración de servicios ecosistémicos y planificación del uso del territorio ¿Es necesario hablar de dinero? En P. Laterra, E.G. Jobbágy y J. M. Paruelo, (Eds.), *Valoración de servicios ecosistémicos: conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento*

*territorial* (pp. 359-390). Buenos Aires, Argentina: Ediciones INTA. Recuperado de: [https://inta.gov.ar/sites/default/files/script-tmp-inta\\_\\_valoracion\\_de\\_servicios\\_ecosistemicos.pdf](https://inta.gov.ar/sites/default/files/script-tmp-inta__valoracion_de_servicios_ecosistemicos.pdf)

QUÉTIER, F., Tapella, E., Conti, G., Cáceres, D. y Díaz, S. (2007). Servicios ecosistémicos y actores sociales. Aspectos conceptuales y metodológicos para un estudio interdisciplinario. *Gaceta Ecológica*, 84-85, 17-26.

QUIJAS, S., Schmid, B. y Balvanera, P. (2010). Plant diversity enhances provision of ecosystem services: a new synthesis. *Basic and Applied Ecology*, 11, 582-593.

REGAIRAZ, M.C. (1996). Clasificación taxonómica de suelos [Mapa]. Recuperado de: <https://www.mendoza-conicet.gov.ar/ladyot/catalogo/cdandes/g0407.htm>

RODVANG, S.J. y Simpkins, W.W. (2001). Agricultural contaminants in Quaternary aquitards: A review of occurrence and fate in North America. *Hydrogeology Journal*, 9(1), 44-59.

ROSAS, Y.M. (2016). *Evaluación biofísica de funciones ecosistémicas en la cuenca del río Tunuyán Superior, Mendoza* (tesis de grado). Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.

SERVIDOR DE MAPAS DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOLÓGICO AMBIENTAL MINERO (SIGAM). (s.f). [Mapa de las Unidades Geológicas de Mendoza]. Recuperado de: <http://sigam.segemar.gov.ar/>

SERVICIO NACIONAL DE SANIDAD Y CALIDAD AGROALIMENTARIA (SENASA). (2018). Situación de la Producción Orgánica en la Argentina durante el año 2017. Recuperado de: [https://www.argentina.gov.ar/sites/default/files/1\\_situacion\\_de\\_la\\_po\\_en\\_la\\_argentina\\_2017\\_0.pdf](https://www.argentina.gov.ar/sites/default/files/1_situacion_de_la_po_en_la_argentina_2017_0.pdf)

SORTINO, J.F. (2013). *Cartografía de la vulnerabilidad intrínseca frente al peligro de contaminación de agua subterránea en el acuífero de la cuenca norte* (tesis de posgrado). Universidad de Málaga, Málaga, España.

TERUYA, J. (2015). Evaluación biofísica de servicios ecosistémicos en la cuenca del A° Grande, Tunuyán, Mendoza (tesina de Grado). Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.

TORRES, E. y Zambrano, J. (1996). Catálogo de recursos humanos e información relacionada con la temática ambiental en la región andina argentina. Hidrogeología de la provincia de Mendoza.

TORRES, E. y Zambrano, J. (1996). Catálogo de recursos humanos e información relacionada con la temática ambiental en la región andina argentina. Mapa hidrogeológico con referencia a las cuencas de aguas subterráneas.

TURNER, R., Paavola, J., Cooper, P., Farber, S., Jessamy, V. y Georgiou, S. (2003). Valuing nature: lessons learned and future research directions. *Ecological economics*, 46, 493-510.

ULANOWICZ, R.E. (1997). Limitations on the connectivity of ecosystem flow networks. En A. Rinaldo y A.A. Marani, (Eds.), *Biological Models* (pp. 125-143). Venecia, Italia: Instituto Veneto de Scienze, Lettere ed Art.

UNESCO/WMO (1992). *Glosario Internacional de Hidrología*. Ginebra 2, Suiza. Organización Meteorológica Mundial.