

Evaluación y cartografía de la variabilidad de la vulnerabilidad del acuífero libre de Doñana a la contaminación de las aguas subterráneas

Evaluation and cartography regarding the variability of the vulnerability of Doñana's unconfined aquifer towards groundwater contamination

Trabajo Fin de Grado en Ciencias Ambientales
Universidad de Málaga

Autor: Nane María Weber Carpintier

Área de conocimiento y Departamento: Geografía Física, Departamento de Geografía

Fecha de presentación: Noviembre, 2019

Tema: Evaluación y cartografía de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación de las aguas subterráneas

Nº de páginas: 21

Nº de páginas de anexos: 2

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD DEL TFG

Dña. **Nane María Weber Carpintier**, estudiante del **Grado en Ciencias Ambientales** de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Málaga,

DECLARO:

Que he realizado el Trabajo Fin de Grado titulado "**Evaluación y cartografía de la variabilidad de la vulnerabilidad del acuífero libre de Doñana a la contaminación de las aguas subterráneas**" y que lo presento para su evaluación. Dicho trabajo es original y todas las fuentes bibliográficas utilizadas para su realización han sido debidamente citadas en el mismo.

Para que así conste, firmo la presente en Málaga, el 29 de noviembre de 2019

A handwritten signature in black ink, reading 'Nane Weber', written in a cursive style.

Nane María Weber Carpintier

ÍNDICE

Resumen	1
Abstract	2
1. Introducción	3
1.1. Objetivos	4
2. Características generales	4
2.1. Localización	4
2.2. Características climáticas	6
2.2.1. <i>Estación meteorológica</i>	6
2.2.2. <i>Análisis de los datos pluviométricos</i>	7
2.3. Geología	7
2.4. Hidrografía	9
2.4.1. <i>Inventario de Puntos de Agua</i>	9
2.4.2. <i>Piezometría</i>	10
2.4.3. <i>Funcionamiento hidrogeológico</i>	11
2.5. Usos del suelo	11
2.6. Usos de las aguas subterráneas	12
3. Método	12
3.1. Parámetros del método GOD	12
3.2. Índice de Vulnerabilidad	14
3.3. Aplicación del método	14
3.3.1. <i>Recopilación de información</i>	15
3.3.2. <i>Geoprocesamiento</i>	15
3.3.3. <i>Obtención de resultados</i>	17
3.4. Comentario	17
3.5. Determinación de la variabilidad	17
4. Resultados	18
2.1. Mapas de Vulnerabilidad	18
2.2. Mapa de la Variabilidad de la Vulnerabilidad	20
5. Discusión	21
6. Conclusión	23
Bibliografía	24
ANEXOS	26

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de la localización geográfica de la zona de estudio	5
Figura 2. Mapa de la composición litológica del acuífero libre de Doñana	8
Figura 3. Mapa hidrográfico del acuífero libre de Doñana	10
Figura 4. Mapas de Vulnerabilidad del acuífero libre de Doñana a la contaminación de las aguas subterráneas	19
Figura 5. Mapa de la Variabilidad de la Vulnerabilidad del acuífero libre de Doñana a la contaminación de las aguas subterráneas	20

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas UTM	4
Tabla 2. Rango y puntuación asignada por el método GOD al tipo de acuífero (G)	12
Tabla 3. Rango y puntuación asignada por el método GOD a la litología (O)	13
Tabla 4. Rango y puntuación asignada por el método GOD a la profundidad del nivel piezométrico (D)	13
Tabla 5. Clases de Vulnerabilidad del Índice de Vulnerabilidad según el método GOD	14

Evaluación y cartografía de la variabilidad de la vulnerabilidad del acuífero libre de Doñana a la contaminación de las aguas subterráneas

RESUMEN

Este estudio presenta la evaluación y cartografía de la variabilidad de la vulnerabilidad del acuífero libre de Doñana (SO de Península Ibérica) a la contaminación de las aguas subterráneas. En concreto, se analiza la variación de la vulnerabilidad a lo largo del año. Para obtener la cartografía de la vulnerabilidad, basada en sistemas de información geográfica (SIG), se usa el método GOD. Dicho método establece tres parámetros determinantes de la vulnerabilidad: el tipo de acuífero, la composición litológica y la profundidad del agua subterránea. La información geográfica de los tres factores ha sido proyectada y geoprocesada a través de herramientas SIG, con el fin de definir las zonas de vulnerabilidad para cada mes del año. A partir del análisis comparativo de estos mapas, se ha generado el mapa de variabilidad de la vulnerabilidad, que demuestra la existencia de una variación moderada. Esta variación se debe al cambio intraanual del único parámetro variable, la profundidad del agua subterránea, que a su vez depende de la recarga del acuífero.

Palabras clave:

vulnerabilidad, acuífero, variabilidad, aguas subterráneas, GOD, Doñana, SIG

Evaluation and cartography regarding the variability of the vulnerability of Doñana's unconfined aquifer towards groundwater contamination

ABSTRACT

This study presents the evaluation and cartography regarding the variability of the vulnerability of Doñana's unconfined aquifer (SW of the Iberian Peninsula) towards groundwater contamination. Specifically, it analyses the variation of vulnerability throughout the year. The GOD method was used in order to obtain the GIS-based cartography of vulnerability. Said method establishes three parameters as determinants of vulnerability: groundwater confinement, overlying strata and depth to groundwater table. The geographic information of the three parameters was projected and processed, using GIS mapping techniques, in order to define the vulnerable areas of each month. Based on a comparative analysis of those maps, the cartography regarding the variability of the vulnerability was generated, proving the existence of a moderate variation. Said variation stems from the intraannual change regarding the only variable parameter, the depth to groundwater table, which, in turn, depends on groundwater recharge.

Key words:

vulnerability, aquifer, variability, groundwater, GOD, Doñana, GIS

1. Introducción

La contaminación de las aguas subterráneas a causa de la actividad humana es un fenómeno que se estableció con la revolución neolítica, cuando el ser humano se convirtió en un ser sedentario (hace aproximadamente 10.000 años). El sedentarismo del hombre marcó el comienzo de las actividades agrícolas y ganaderas, del depósito de residuos domésticos y de la liberación de aguas residuales. Desde entonces, la polución de aguas subterráneas, consecuencia de la infiltración de agentes contaminantes desde la superficie hasta el nivel freático, se ha ido desarrollando de acuerdo con el crecimiento demográfico, las necesidades asociadas, y el desarrollo industrial.

En los próximos 30 años, se espera un crecimiento demográfico mundial de 2,5 mil millones de personas, de 7,3 mil millones de habitantes en 2019 a 9,8 mil millones en 2050 (UNDESA, 2017). Dicho crecimiento significativo, y los cambios ligados a los patrones de consumo, requerirán la producción de más comida, y de comida más diversa. Las consecuencias serán la expansión e intensificación de la agricultura y de la ganadería (FAO, 2017). En cifras, se espera un aumento de 70 % en producción de alimentos, 100 % en países en desarrollo, con respecto a los niveles actuales (FAO, 2011). A nivel mundial, el nitrato es el contaminante más común con respecto a la polución de aguas subterráneas (WWAP, 2013), y procede principalmente de las actividades agrícolas. Actualmente, el 38 % de las masas de agua subterránea de la Unión Europea se ven afectadas por la contaminación procedente de la agricultura (WWAP, 2015).

La masa de agua subterránea de Doñana es una de ellas (CHG, 2015). Debido a condiciones climáticas, topográficas e hidrogeológicas favorables, la zona de Doñana (Andalucía, España) presenta una presión antrópica importante, especialmente con respecto a la presión agrícola. Los posibles agentes contaminantes, procedentes de las actividades agrícolas realizadas sobre el terreno, pueden perjudicar la calidad de las aguas subterráneas. En el caso de Doñana, las aguas subterráneas están directamente relacionadas con espacios naturales protegidos presentes en la zona. Con el fin de asegurar y/o mantener la calidad de las aguas subterráneas, se hace uso de la cartografía de vulnerabilidad.

La elaboración de mapas de vulnerabilidad consiste en determinar la susceptibilidad de un acuífero a la contaminación de las aguas subterráneas. Los mapas digitales de vulnerabilidad se basan en el análisis y la relación de distintos parámetros determinantes de la vulnerabilidad mediante sistemas de información geográfica (SIG). Existe una serie de métodos que permiten obtener los índices de vulnerabilidad de un acuífero a partir de información geográfica. El método GOD, elaborado por Foster e Hirata (1988), supone que la vulnerabilidad intrínseca de un acuífero depende de tres factores: el tipo de acuífero, la composición litológica y la profundidad del agua subterránea.

La aplicación de este método permitirá definir las zonas de vulnerabilidad del acuífero, lo cual será de gran utilidad a la hora de proteger las zonas más vulnerables no sólo de las presiones actuales, sino también de futuras presiones ligadas al crecimiento demográfico y la intensificación agrícola.

1.1 Objetivos

El objetivo del estudio consiste en determinar la variabilidad de la vulnerabilidad del acuífero libre de Doñana a la contaminación de las aguas subterráneas. En concreto, se pretende estudiar cómo varía la vulnerabilidad del acuífero a lo largo del año. Esto requiere la elaboración de doce mapas digitales de vulnerabilidad, uno para cada mes, y su posterior análisis comparativo, en forma de un único mapa de variabilidad de la vulnerabilidad.

2. Características generales

2.1. Localización

El acuífero libre de Doñana se extiende con un área de 1378,3 km² sobre el suroeste de la Península Ibérica (Comunidad Autónoma de Andalucía), mayoritariamente sobre el sur de la provincia de Huelva y a menor medida sobre el oeste de la provincia de Sevilla. Se distribuye por un total de 21 municipios: Almonte, Hinojos, Rociana del Condado, Villamanrique de la Condesa, Bollullos Par del Condado, Bonares, Pilas, Lucena del Puerto, Huévar del Aljarafe, Chucena, Manzanilla, Aznalcázar, Moguer, Villalba del Alcor, La Palma del Condado, Villarrasa, Niebla, Escacena del Campo, Paterna del Campo, Castilleja del Campo y Carrión de los Céspedes.

El acuífero libre de Doñana está limitado en el norte por las estribaciones de la Sierra de Huelva (El Andévalo), en el oeste y noroeste por la cuenca del Río Tinto, en el este por las marismas de Doñana (las cuales forman parte del complejo de marismas del Guadalquivir) y en el sur y suroeste por el océano Atlántico.

En términos de coordenadas (WGS 84), el acuífero se ubica entre las latitudes N 36° 55' – N 37° 25' y las longitudes W 6° 46' – W 6° 15'. Las coordenadas UTM son:

X máxima	211234	Y máxima	4147418
X mínima	164956	Y mínima	4092393

Tabla 1. Coordenadas UTM

Existen tres motivos principales que han determinado el área de estudio: el gran valor ecológico y paisajístico con una necesidad de conservación importante, la presión antrópica debida a las actividades agrícolas, y la disponibilidad de información necesaria para el análisis de la vulnerabilidad. El Espacio Natural Doñana es una de las áreas naturales protegidas más importantes de Europa. Cuenta con una biodiversidad única y un mosaico de ecosistemas que lo albergan. El bosque mediterráneo, los pinos piñoneros, las dunas y las marismas son los principales ecosistemas de Doñana. Constituyen los hábitats de especies vegetales y zoológicas protegidas, como por ejemplo el lince ibérico, la tortuga mora, el águila imperial etc. Las marismas de Doñana (figura 1) son de particular

importancia, ya que forman un lugar de paso, cría e invernada para miles de aves europeas y africanas. Dado que una parte del agua que alcanza las marismas procede de descargas del acuífero libre, es importante estudiar su vulnerabilidad para así prevenir una posible contaminación y tomar las medidas necesarias para su protección.

Debido a características climáticas e hidrogeológicas favorables, el área de estudio ha sido y sigue siendo un lugar ideal para actividades socioeconómicas como la agricultura. La combinación entre cultivos tradicionales, como el olivar o el viñedo de secano, y cultivos más recientes, como los cítricos, frutales o los cultivos bajo plástico (fresa, arándano, etc.), ha sido la causa principal de la contaminación por nitratos y la extracción insostenible de aguas subterráneas. Con respecto a la disponibilidad de información cabe destacar que el área de estudio ha sido objeto de investigación en múltiples ocasiones, sobre todo en temas de hidrogeología.

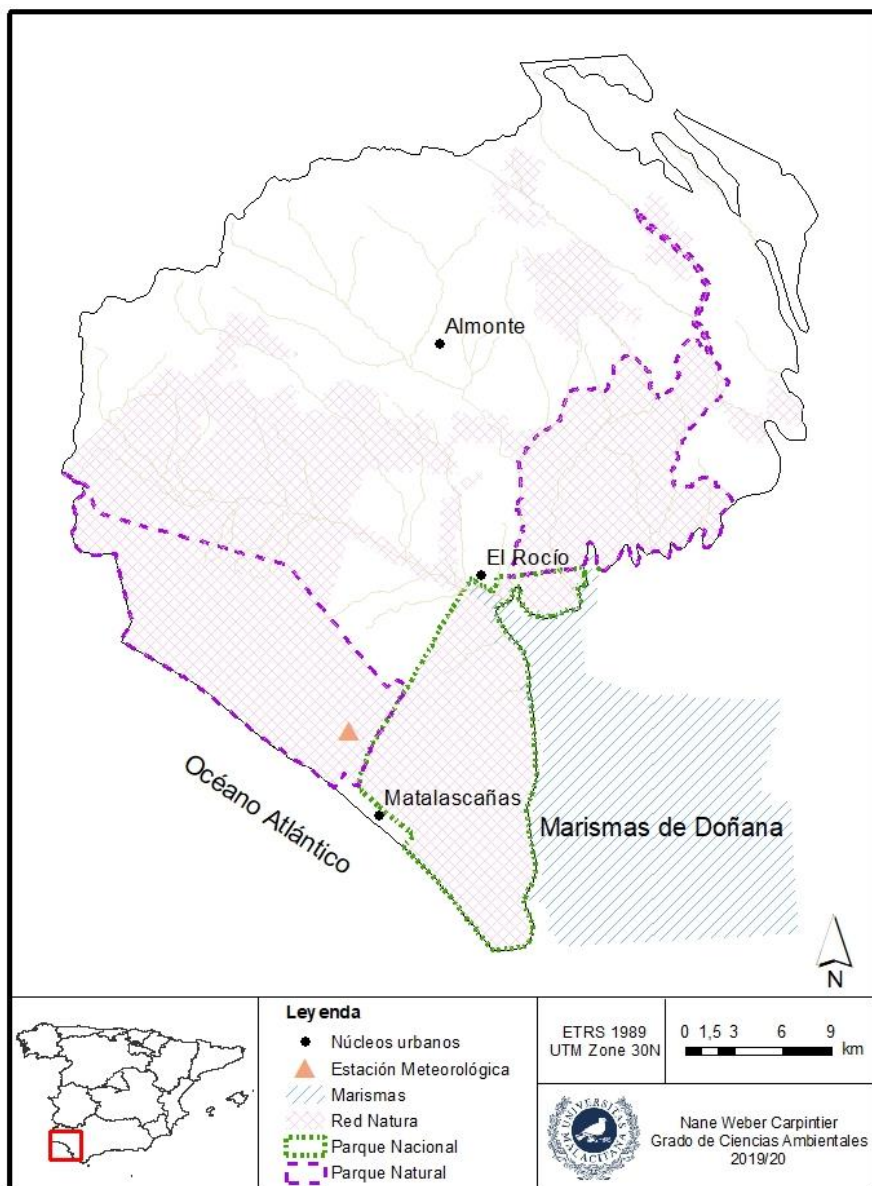


Figura 1. Mapa de la localización geográfica de la zona de estudio. El 32,1 % del acuífero libre de Doñana se sitúa bajo el Espacio Natural Doñana, incluyendo parte del Parque Nacional y Natural de Doñana, y zonas pertenecientes a la Red Natura 2000.

2.2. Características climáticas

Las condiciones climáticas que afectan el área de estudio dependen de su situación geográfica, en concreto, de su posición en latitud. Dado que el acuífero de Doñana se ubica en la costa sur-atlántica andaluza (N 36° 55' – N 37° 25'), el clima condicionante es el clima mediterráneo marítimo. Dicho clima se caracteriza por la influencia del océano Atlántico, la cual se manifiesta principalmente en las oscilaciones entre las temperaturas medias máximas y mínimas, y en el volumen de las precipitaciones.

Las temperaturas se caracterizan por una amplitud térmica media (entre 13 °C y 16 °C). Los veranos son calurosos con temperaturas medias de aproximadamente 25 °C (en julio y agosto) y los inviernos son suaves con temperaturas medias entre 10 °C y 12 °C. En general, las precipitaciones son escasas a moderadas (entre 300 – 800 mm), irregulares y tormentosas. Debido a la proximidad al Atlántico, las precipitaciones anuales son más abundantes (entre 500 – 700 mm) con un máximo pluviométrico a finales de otoño-invierno.

El régimen pluviométrico, es decir el volumen y la irregularidad de las lluvias, permite entender las variaciones que se generan en los niveles piezométricos, ya que están directamente relacionados. La recarga del acuífero se debe únicamente a la infiltración de las precipitaciones (Manzano y Custodio, 2007). Dicho factor es, por lo tanto, determinante e imprescindible a la hora de evaluar la vulnerabilidad de un acuífero.

2.2.1. Estación meteorológica

Los registros pluviométricos (ANEXO I) proceden de una estación meteorológica ubicada en la Reserva Biológica de Doñana (Almonte, Huelva) a una altura de 47 metros sobre el nivel del mar. La estación meteorológica proporciona una serie de datos meteorológicos importantes para las investigaciones que se realizan en la Estación Biológica de Doñana, un instituto de investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). La estación fue instalada en el año 1978 siguiendo los estándares fijados por la Organización Meteorológica Mundial (WMO). Su registro es manual y ha sido revisado por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) hasta el año 2008. En 2008, la AEMET instaló una nueva estación propia que permite un registro automatizado. Desde 2013, la Estación Biológica de Doñana ha instalado una estación meteorológica adicional (de la marca VAISALA) que guarda los datos de manera automática.

2.2.2. Análisis de los datos pluviométricos

El presente estudio pretende analizar la variabilidad de la vulnerabilidad del acuífero de Doñana a lo largo del año. Como se ha mencionado anteriormente, la precipitación, entre otros factores, determina la profundidad de los niveles piezométricos, que, a su vez, es un parámetro para el cálculo de la vulnerabilidad.

Para el análisis de los datos pluviométricos se han recopilado los valores medios mensuales de precipitación del año hidrológico 1994/95 hasta el año hidrológico 2017/2018.

Según los valores registrados en la estación meteorológica, la precipitación media anual de la zona de estudio es de 560 mm. El año hidrológico 04/05 registró el volumen de precipitación más bajo con 169,8 mm y el año hidrológico 95/96 midió el volumen de precipitación más elevado con 1027,8 mm. En general, los datos pluviométricos reflejan la presencia de un clima mediterráneo marítimo. En verano, durante los meses de junio, julio y agosto, la precipitación media mensual no supera los 5 mm y, en otoño-invierno, se observan precipitaciones medias mensuales más elevadas, aunque escasas, con un máximo de 108,4 mm en el mes de diciembre.

2.3. Geología

A gran escala, se pueden diferenciar dos grandes unidades geológicas que enmarcan el valle del Guadalquivir, la Sierra Morena en el norte y las Cordilleras Béticas en el sureste, quedando abierto al Atlántico en el suroeste. Las mencionadas unidades montañosas y los procesos de erosión posteriores a su orogenia han sido los principales proveedores de sedimentos para el relleno del valle, junto a la intrusión marina.

La siguiente serie estratigráfica se caracteriza por la juventud de las capas que la componen, con una historia geológica de unos 25 millones de años (el periodo Neógeno, que comprende el Mioceno y Plioceno, y el periodo Cuaternario).

Los sedimentos que constituyen el acuífero de Doñana (figura 2) proceden de edad Pliocena a Cuaternaria y son mayoritariamente no consolidados. Se encuentran depositados sobre una capa espesa de margas azules del Mioceno que forman la base impermeable del acuífero y lo limitan en su borde norte debido a un afloramiento. Sobre esta capa impermeable se asientan materiales sedimentarios (calcarenitas, margas, arenas y calizas) del Mioceno superior-Plioceno, principalmente semipermeables-permeables, que afloran en el norte y noreste del acuífero. A esta capa anterior se superpone, de manera discordante, un tramo de arenas basales del Plioceno. El afloramiento de este tramo constituye un nivel acuífero muy importante gracias a su gran extensión (oeste-este) y su permeabilidad (principalmente arenas, y margas). Los materiales del Plioceno-Cuaternario (conglomerados, arenas, lutitas y calizas), depositados sobre el tramo de arenas basales, formaron, en su momento, un glacis (formación roja) que llegó a ocupar una extensión considerable. A causa de la posterior erosión del glacis y su removida por la red fluvial, los materiales afloran de forma puntual y

con bajas extensiones laterales. La posterior capa de edad Cuaternaria se compone principalmente por arenas de ambiente aluvial, lagunar y eólico. Los depósitos de arenas eólicas sobre las formaciones arenosas aluviales forman el Manto Eólico Litoral de Doñana, que se extiende sobre una buena parte de la zona más próxima a la costa, y cordones de dunas antiguas y vivas. El Manto Eólico es un sistema permeable y de gran importancia para la recarga del acuífero libre. Los aluviales se componen por sedimentos recientes (limos, arcillas, gravas, cantos y arenas) depositados en los cauces de los ríos y arroyos, concluyendo así la serie estratigráfica de la zona (Martin, M., López, J. & et al., 1992).

Con respecto a la tectónica cabe mencionar que las series depositadas de edad Neógena-Cuaternaria han sufrido una deformación tectónica mínima y mantienen, en general, su original horizontalidad. Existen algunos basculamientos recientes de poco interés hidrogeológico en la zona de estudio (Martin, M., López, J. & et al., 1992).

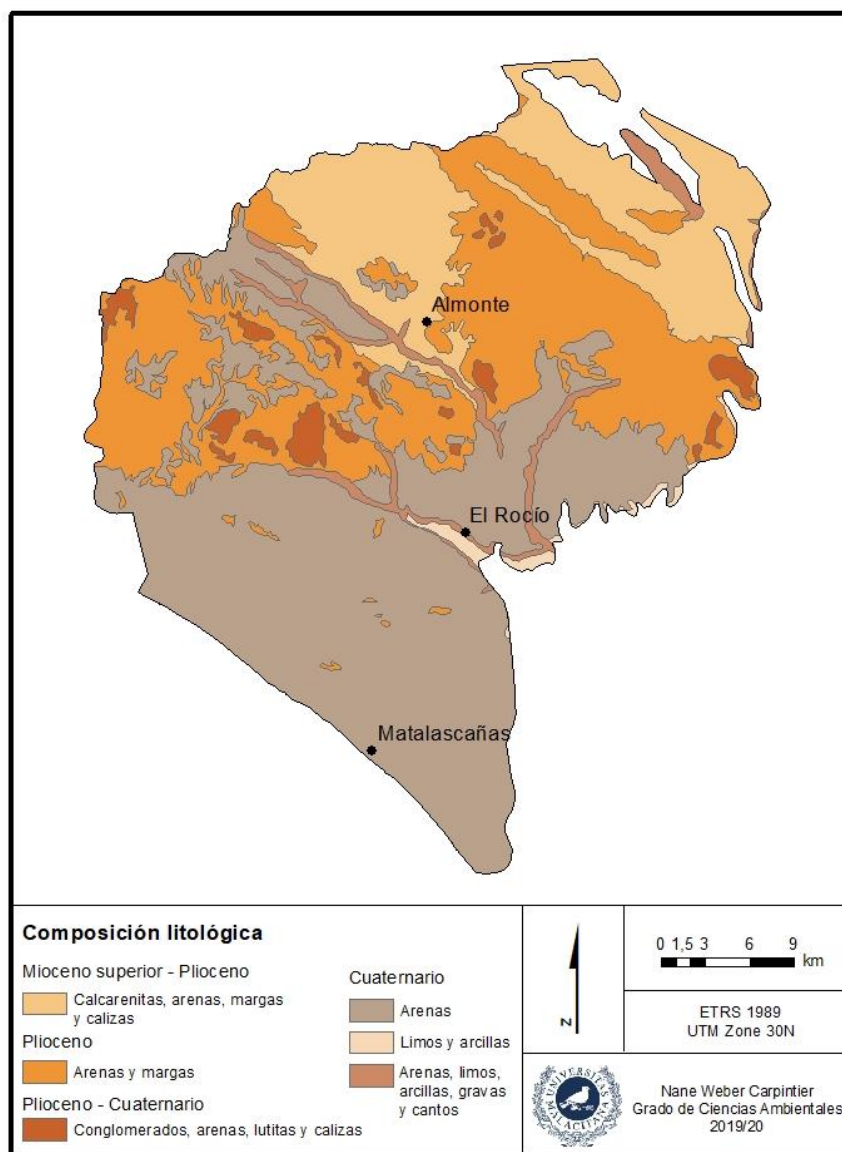


Figura 2. Mapa de la composición litológica del acuífero libre de Doñana

2.4. Hidrografía

El acuífero libre de Doñana se ubica en la cuenca hidrográfica del Guadalquivir y se encuentra enmarcado hidrogeológicamente por una capa de margas impermeables en su base y en el norte gracias a un afloramiento, por el río Guadimar como delimitador de aguas subterráneas en el noreste, por el acuífero semiconfinado de las marismas en el este, por el océano Atlántico en el sur y suroeste, y por el río Tinto como eje de drenaje en el oeste y noroeste.

2.4.1. Inventario de Puntos de Agua

El análisis del comportamiento piezométrico del acuífero libre de Doñana se basa en los datos proporcionados por la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM). Los datos se componen por 15.454 valores de nivel piezométrico que fueron medidos entre 1995 y 2017 por los siguientes organismos públicos: el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG), y la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. El inventario de puntos de agua contiene un total de 336 pozos y sondeos (figura 3) que se distribuyen por el área de estudio de manera representativa con una concentración en el Arroyo de La Rocina. Las cotas de los puntos de agua van disminuyendo de manera suave conforme se avanza del norte y noroeste hacia el sur y sureste de la zona estudiada. El punto de agua más elevado se encuentra a una altura de 166 metros sobre el nivel del mar y está ubicado en el límite septentrional del acuífero, y las cotas más bajas (a nivel del mar) se localizan en las zonas más próximas a la costa y a las Marismas de Doñana. La mayoría de los pozos tiene profundidades inferiores a 10 m, presentando caudales de menos de 2 l/s en el norte del acuífero. Las profundidades de los sondeos no suelen sobrepasar los 70 m y se registran caudales medios de 70 a 80 l/s (Martin, M., López, J. & et al., 1992). No existen manantiales significativos en la zona de estudio, se observan ciertas surgencias temporales (Martin, M., López, J. & et al., 1992).

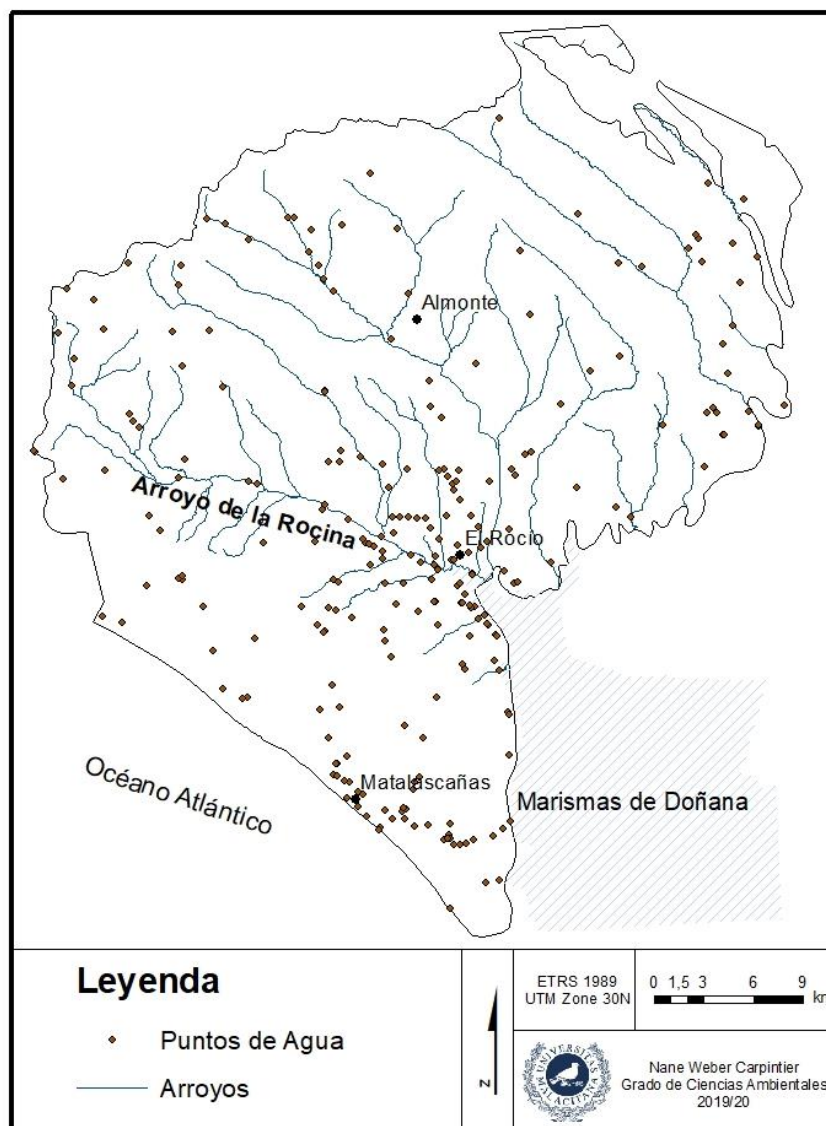


Figura 3. Mapa hidrográfico del acuífero libre de Doñana.

2.4.2. Piezometría

Para el control periódico del nivel piezométrico se emplean sondeos piezométricos o captaciones de agua preexistentes, como pozos y sondeos, donde se miden las profundidades del agua en metros. El registro de los niveles piezométricos y de las cotas de los puntos de agua permite la elaboración de un mapa de isopiezas (ANEXO II) que indica las distintas alturas del agua subterránea con respecto al nivel del mar. Como resultado, se observa que los niveles piezométricos se adaptan a la topografía (Martin, M., López, J. & et al., 1992). Partiendo de valores medios, se registran cotas de aproximadamente 100 – 140 m.s.n.m. en el norte y noroeste del área estudiada, y cotas inferiores a 10 m.s.n.m. en las zonas próximas a la costa y a las marismas.

2.4.3. Funcionamiento hidrogeológico

Como anteriormente expuesto, el sistema hidrogeológico de la zona de estudio se compone por una sucesión de sedimentos detríticos no consolidados que, gracias a su permeabilidad, se comporta como un acuífero libre. El acuífero libre en cuestión se recarga únicamente a través de la infiltración directa de la lluvia que cae sobre este. La capacidad de infiltración del acuífero depende de la litología (figura 2). La mayor parte del área estudiada es topográficamente suave y se compone por arenas permeables, de modo que la capacidad de infiltración es alta. En la parte central del acuífero, sentido oeste-este, existen afloramientos de arenas permeables, las arenas basales del Plioceno, que presentan tasas media-altas de infiltración. Los materiales procedentes del Mioceno superior, que forman el norte del acuífero, son semipermeables-permeables y topográficamente más acentuados, por lo cual la recarga es algo inferior. Los aluviales, compuestos principalmente por limos y arcillas, son poco permeables con una capacidad de infiltración baja. Las aguas subterráneas siempre fluyen de cotas superiores a cotas inferiores. A escala regional, el mapa de isopiezas muestra una dirección preferencial del flujo hacia las marismas de Doñana. Existen otras trayectorias del agua, aunque con recorridos más cortos. En la franja costera las aguas subterráneas se mueven hacia el océano y en el noroeste del acuífero fluyen hacia el río Tinto. La descarga natural del sistema hidrogeológico estudiado se produce por: 1) los arroyos (siendo La Rocina el más importante) y los ríos; 2) la costa hacia el océano Atlántico; 3) por el acuífero semiconfinado bajo las marismas, en forma de flujos ascendentes; y 4) por evaporación de la superficie freática cuando está a poca profundidad (Manzano y Custodio, 2007).

2.5. Usos del suelo

Debido a las condiciones climáticas, topográficas e hidrogeológicas favorables, el acuífero libre de Doñana presenta una presión antrópica importante. Dentro de la actividad antrópica destaca la actividad agrícola que cubre el 40 % de la superficie total. Las zonas agrícolas se sitúan principalmente en el norte de la zona estudiada y se componen por mosaicos de cultivos, olivares, frutales, arrozales, cultivos bajo plástico, tierras de labor en secano, tierras regadas permanentemente y sistemas agroforestales (IECA, 2019).

Las zonas forestales y las zonas de vegetación natural cubren la mayor parte del área de estudio con un 58 %. Son formados por bosques de frondosas, bosques de coníferas, bosques mixtos, pastizales y/o zonas de vegetación esclerófila que se extienden principalmente sobre la parte austral del acuífero. Los núcleos urbanos ocupan superficies pequeñas (en relación con la superficie total) y se encuentran dispersados sobre el área. El núcleo costero de Matalascañas destaca por la actividad turística que registra en los meses de verano. Existen zonas de explotación minera en el límite septentrional, aunque son de escasa extensión.

2.6. Usos de las aguas subterráneas

Como expuesto en el apartado anterior, el acuífero libre de Doñana cuenta con dos presiones antrópicas principales: la actividad agrícola y los núcleos urbanos. Ambas presiones se aprovechan, en mayor o menor medida, de las aguas subterráneas que alberga el acuífero. A través de extracciones, se satisfacen las necesidades de regadío y de abastecimiento. Según los datos de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (2015), el acuífero dispone de un recurso total de 121,05 hm³ de aguas subterráneas al año. Para el abastecimiento se extraen 4,52 hm³/año de agua y el regadío emplea hasta 66,77 hm³ al año. El índice de explotación del acuífero libre de Doñana asciende al 58,9 %. Sin embargo, la zona de La Rocina registra una sobreexplotación con un índice de 106,7 % (CHG, 2015).

3. Método

Para determinar la vulnerabilidad del acuífero libre de Doñana a la contaminación de las aguas subterráneas se ha elegido el método GOD propuesto por Foster (1987) y Foster & Hirata (1988). El nombre de la metodología se compone por las iniciales (en inglés) de los tres parámetros utilizados:

G = tipo de acuífero (Groundwater confinement)

O = características litológicas (Overlying strata)

D = profundidad del agua subterránea (Depth to groundwater table)

3.1. Parámetros del método GOD

El parámetro **G** describe el tipo de acuífero, es decir, el grado de confinamiento o la ocurrencia de las aguas subterráneas. Según el confinamiento del terreno se asignan puntuaciones entre 0 (ningún tipo de confinamiento) y 1,0 (acuífero libre).

G	
Rango	Puntuación
Ninguno/surgente	0
Confinado	0,2
Semiconfinado	0,4
No confinado (cubierto)	0,6
No confinado	1,0

Tabla 2. Rango y puntuación asignada por el método GOD al tipo de acuífero (G).

El parámetro **O** corresponde a las características litológicas, y el grado de consolidación y fracturación del terreno. Las puntuaciones bajas corresponden a sedimentos no consolidados (0,4) y las más elevadas a rocas compactas fracturadas o karstificadas (0,9 – 1,0).

O			
		Rango	Puntuación
Rocas no consolidadas (sedimentos)		Suelos residuales	0,4
		Limos aluviales, loess, till glacial	0,5
		Arenas eólicas	0,6
		Arenas aluviales y fluvioglaciares	0,7
		Gravas coluviales	0,8
Rocas consolidadas	Porosas o poco fisuradas	Arcillas, lutitas	0,5
		Limolitas, tobas volcánicas	0,6
		Areniscas	0,7
		Calizas blandas, calcarenitas	0,9
	Densas o muy fisuradas	Formaciones ígneas/metamórficas y volcánicas antiguas	0,6
		Lavas volcánicas recientes	0,8
		Caliche y calizas karstificadas	1,0

Tabla 3. Rango y puntuación asignada por el método GOD a la litología (O).

El parámetro **D** indica la profundidad del nivel del agua subterránea. En los acuíferos libres la profundidad del agua subterránea equivale al nivel freático. Puntuaciones bajas (0,6) corresponden a acuíferos con profundidades mayores a 50 m y puntuaciones altas a acuíferos con profundidades de menos de 5 m (0,9) o a acuíferos fracturados independientemente de la profundidad (1,0).

D	
Rango (metros)	Puntuación
< 2 m	1,0
2 – 5 m	0,9
5 – 10 m	0,8
10 – 20 m	0,7
20 – 50 m	0,6
> 50 m	0,5

Tabla 4. Rango y puntuación asignada por el método GOD a la profundidad del nivel piezométrico (D)

3.2. Índice de Vulnerabilidad

El Índice de Vulnerabilidad es el producto de los tres parámetros y presenta valores comprendidos entre 0 y 1:

$$\text{Índice de Vulnerabilidad GOD} = G \times O \times D$$

Los parámetros G y O se consideran estables a lo largo del tiempo, mientras que la profundidad del agua subterránea (D) es variable.

Índice	Clase
0 – 0,1	Inapreciable
0,1 – 0,3	Baja
0,3 – 0,5	Moderada
0,5 – 0,7	Alta
0,7 – 1,0	Extrema

Tabla 5. Clases de Vulnerabilidad del Índice de Vulnerabilidad según el método GOD.

3.3. Aplicación del método

Para la elaboración de mapas de vulnerabilidad es imprescindible el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los SIG son herramientas informáticas que permiten reunir, analizar, editar y representar un gran volumen de datos geográficamente referenciados. El sistema da la posibilidad de crear capas temáticas a partir de datos espaciales, cuyo geoprocesamiento genera, entre otros, la asociación de diferentes variables espaciales. Los mapas juegan un papel fundamental a la hora de visualizar los resultados del análisis espacial de la información geográfica y de los datos descriptivos. La cartografía de la vulnerabilidad del acuífero libre de Doñana se ha realizado a través de ArcGis, un software SIG elaborado por ESRI (Environmental Systems Research Institute). En concreto, se ha utilizado un programa de procesamiento geoespacial llamado ArcMap que se usa para mostrar, editar, crear y analizar datos geoespaciales.

Los resultados de vulnerabilidad se han obtenido como consecuencia de una serie de pasos metodológicos (Vías, 2003):

- Recopilación de información

- Geoprocesamiento

- Obtención de resultados

3.3.1. Recopilación de información

Para el cálculo de la vulnerabilidad según el método GOD se necesita una serie de datos geográficos y descriptivos relacionados con la geología e hidrografía del acuífero. Estos datos, ya existentes en formato digital, proceden de distintas fuentes:

- Área del acuífero. Dicha capa procede del Sistema de Información de Aguas Subterráneas (SIAS) del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), a escala 1:400.000. El archivo está en formato shapefile tipo polígono.

- Puntos de agua. La capa contiene la localización geográfica a escala 1:5.000 de los puntos de control piezométrico y se ha creado a partir de datos procedentes de: la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y el Instituto Geológico y Minero de España. El archivo está en formato shapefile tipo puntos. Incluye además información acerca de la cota de los puntos de agua (m.s.n.m.) y la profundidad de los pozos o sondeos.

- Profundidad del nivel piezométrico. Se trata de una tabla que actúa como base de datos de los puntos de agua. Almacena, entre otros, los valores de profundidad del agua (en metros) y las fechas de medición correspondientes. Es un conjunto de datos que procede de fuentes distintas: la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y el Instituto Geológico y Minero de España. El archivo está en formato dbf.

- Características litológicas. La capa procede del Mapa Geológico-Minero de Andalucía a escala 1:400.000, que se elaboró en 1985 por Adaro, la empresa nacional de investigaciones mineras. Contiene información acerca de la composición litológica de los materiales que constituyen el acuífero. El archivo está en formato shapefile tipo polígono.

3.3.2. Geoprocesamiento

A continuación, se van a nombrar y describir las herramientas utilizadas para la obtención de los mapas de vulnerabilidad según el método GOD. Las herramientas se ejecutan, a través del ArcMap, sobre las capas temáticas mencionadas en el apartado anterior, con el fin de conseguir los valores de los tres parámetros que constituyen el método.

Dado que las capas anteriormente mencionadas contienen datasets grandes (de todo Andalucía), se ha aplicado el *clip* (recortar) como primera herramienta. El *clip* permite extraer entidades de una capa (*input*) utilizando una o más entidades de otra capa (*clip feature*) como molde. De esta manera se han

obtenido las capas del acuífero libre, de los puntos de agua y de la litología de Doñana (en formato *feature class*).

El establecimiento de las puntuaciones, necesarias para poder aplicar la fórmula del método GOD, ha sido bastante complejo con respecto al parámetro D. Como primer paso, se han analizado los valores de profundidad del agua almacenados en la base de datos. Dado que el presente trabajo pretende estudiar la variación de la vulnerabilidad a lo largo del año, se han ordenado los valores de profundidad de cada punto de agua según el mes en el que han sido medidos, independientemente del año. Con el comando *summarize* se han extraído los valores medios de profundidad del agua de cada pozo o sondeo para cada mes. En otras palabras, se han creado 12 tablas, una para cada mes, que recogen las profundidades medias del nivel piezométrico de los puntos de agua. A partir de dichas tablas se ha creado una relación entre los valores medios de profundidad del agua de cada mes y los puntos de agua a los cuales corresponden. En términos simples, se han asignado ubicaciones geográficas a los valores medios de las tablas. Una vez constituida la capa de los puntos de agua con la información piezométrica correspondiente, se ha aplicado la técnica de *interpolación* que consiste en establecer valores en posiciones nuevas, basándose en las mediciones de un conjunto de puntos. En este caso, la interpolación prevé los valores de profundidad del agua de cada celda a partir de los puntos de entrada. Para llevar a cabo la interpolación se ha utilizado la herramienta *kriging*, que se ejecuta 12 veces, una para cada mes, y se extiende únicamente sobre la zona de estudio. Los resultados son 12 rasters con distintas superficies de profundidad. Para poder aplicar el método GOD se han tenido que reclasificar (*reclassify*) los rangos de profundidad del agua, asignando puntuaciones entre 0 y 1 según la tabla 2. Una vez reclasificados, los rasters se han convertido a entidades de polígono para su posterior intersección (*intersect*) con la capa litológica de Doñana (apartado 3.3.3.).

La obtención de los valores del parámetro O no ha requerido la ejecución de una serie compleja de herramientas, dado que la información litológica ya estaba disponible en forma de entidades de polígono. Según la composición litológica de cada entidad, se han fijado puntuaciones entre 0 y 1 (véase tabla 3).

El parámetro G no ha requerido ningún tipo de geoprocésamiento ya que se trata de un acuífero libre. Según la tabla 2, los acuíferos libres se puntúan con el valor 1. Como la fórmula del método GOD consiste en la multiplicación de los tres parámetros, no se ha considerado necesario la creación de una clase de entidades para el parámetro G.

3.3.3. Obtención de resultados

Como anteriormente mencionado, el índice de vulnerabilidad se obtiene aplicando la fórmula del método GOD. Para poder representar los valores en el mapa, se ha utilizado la herramienta *intersect* (intersección) que permite crear entidades nuevas a partir de las superficies comunes de cualquiera de las entidades escogidas, siempre que cuenten con el mismo tipo de geometría. En este caso se han creado entidades nuevas desde la intersección de las distintas capas del parámetro D y de la capa del parámetro O, de modo que se han generado 12 capas de vulnerabilidad, una para cada mes. Una vez generadas, se ha calculado el índice de vulnerabilidad (a través del *field calculator*) multiplicando las puntuaciones del parámetro D con las del parámetro O para cada entidad. A partir del índice de vulnerabilidad se han establecido también las clases de vulnerabilidad correspondientes. Con el objetivo de simplificar la cartografía, y con esto se concluye el proceso de elaboración de los mapas de vulnerabilidad, se han agregado superficies adyacentes con la misma clase de vulnerabilidad mediante la herramienta *dissolve*.

3.4. Comentario

Con respecto a la base de datos de los puntos de agua (REDIAM, n.d.), es decir la información disponible acerca de la profundidad del nivel piezométrico, cabe mencionar lo siguiente. En algunas ocasiones, a la hora de medir, se han presentado ciertos obstáculos como pozos secos, instrumentos de medición atascados o pozos destruidos. Los resultados de dichas mediciones, anotados en la tabla con valor 0, se han tenido que excluir a la hora de calcular los valores medios de profundidad.

3.5. Determinación de la variabilidad

El trabajo pretende estudiar la variación de la vulnerabilidad del acuífero libre de Doñana a lo largo del año. Aparte de elaborar los 12 mapas de vulnerabilidad, uno para cada mes, se ha generado un único mapa visualizando aquellos campos que presentan la misma clase de vulnerabilidad a escala anual, y aquellos que no.

El mapa de variación de la vulnerabilidad se ha creado desde la intersección de las doce capas de vulnerabilidad (apartado 3.3.), basándose en la clase de vulnerabilidad. Para poder conocer la variabilidad de forma automática, se han codificado las clases de vulnerabilidad con un número (Muy Baja=1, Baja=2, Moderada=3, Alta=4, Extrema=5). A posteriori, se han calculado los valores máximos y mínimos de cada entidad (*field calculator*). La diferencia entre el máximo y el mínimo indica si la vulnerabilidad cambia o no. Si el resultado de la resta es cero significa que no hay cambio y si el resultado de la resta es 1, la vulnerabilidad cambia en una categoría. Si la diferencia es 2, la vulnerabilidad cambia en dos categorías, y así hasta una diferencia máxima de 4. Una vez establecida la variabilidad, se han eliminado los bordes entre entidades iguales y adyacentes (*dissolve*). El resultado

es un mapa que muestra donde cambia la vulnerabilidad a lo largo del año y donde no cambia, especificando también la clase de vulnerabilidad que no varía.

4. Resultados

4.1. Mapas de Vulnerabilidad

La figura 4 contiene doce mapas de vulnerabilidad, uno para cada mes, visualizando la evolución de la vulnerabilidad del acuífero libre de Doñana a lo largo del año. El análisis espacial según el método GOD ha permitido la obtención de los siguientes resultados. A escala regional, se observa que la mayor parte del acuífero libre de Doñana registra una vulnerabilidad moderada (puntuación de 0,3 – 0,5 según el método GOD) a lo largo del año. Las zonas de vulnerabilidad moderada ocupan un máximo de 63,1 % de la superficie total en el mes de agosto y un mínimo de 54,3 % en el mes de abril. El este del acuífero presenta superficies muy pequeñas de vulnerabilidad baja (0,1 – 0,3), de modo que no superan el 0,13 % de la superficie total en agosto y desaparecen por completo en los meses de abril, julio y septiembre. La vulnerabilidad alta (0,5 – 0,7) es la segunda más predominante y se detecta principalmente en el norte y noreste del acuífero, en los alrededores del arroyo de la Rocina y en las zonas pegadas a las marismas de Doñana (sur-sureste). Llega a ocupar un máximo de 41,16 % de la superficie total en diciembre y un mínimo de 35,55 % en el mes de mayo. Las zonas del acuífero con vulnerabilidades extremas (0,7 – 1,0) se localizan principalmente en el noroeste y, en los meses de abril y mayo, en el noreste del área de estudio. Con respecto a la superficie total, ocupan una superficie máxima de 6,3 % en abril y una superficie mínima de 0,59 % en agosto.

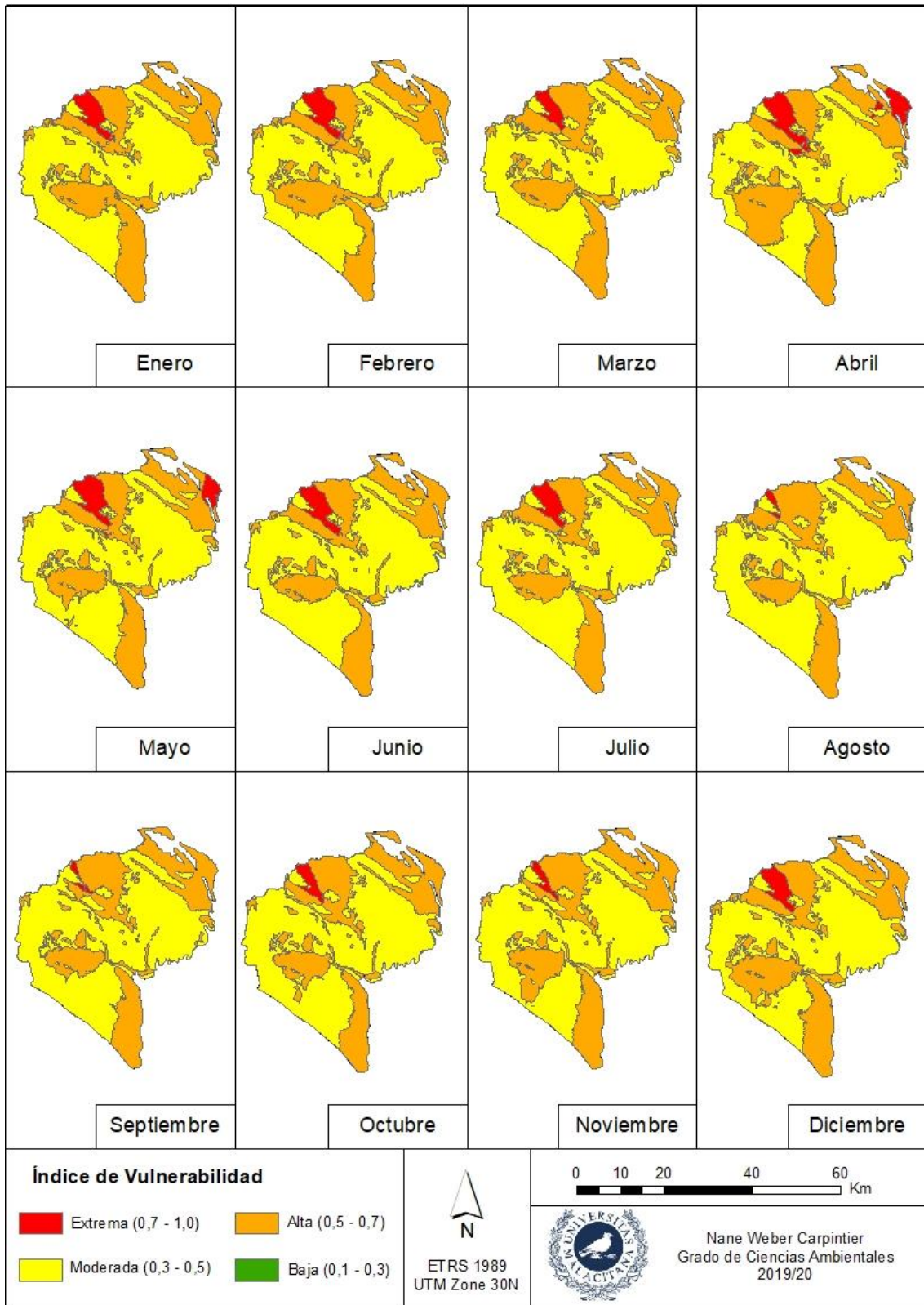


Figura 4. Mapas de Vulnerabilidad del acuífero libre de Doñana a la contaminación de las aguas subterráneas

4.2. Mapa de Variabilidad de la Vulnerabilidad

El mapa de variabilidad de la vulnerabilidad (figura 5) indica qué zonas del acuífero libre de Doñana registran una vulnerabilidad invariable a lo largo del año, y cuáles cambian de clase de vulnerabilidad. La vulnerabilidad moderada invariable predomina en la zona de estudio, extendiéndose sobre el 50,29 % de la superficie total. La vulnerabilidad alta invariable se presenta principalmente en el norte y noreste del acuífero, en los alrededores del arroyo de la Rocina, en las zonas colindantes a las marismas y en la parte más austral, de modo que ocupa el 26,4 % de la superficie total. Se detecta una vulnerabilidad extrema de carácter permanente en el noroeste del acuífero, aunque de escasa superficie (0,41 % de la superficie total). La vulnerabilidad baja no se impone en el acuífero de forma constante, por lo cual no aparece en el mapa. La superficie restante (22,9 %) incluye aquellas zonas donde la vulnerabilidad cambia de clase a lo largo del año. Dichas zonas se localizan en el sur y suroeste, donde se ubica el manto eólico, y en el noreste y noroeste del área estudiada. En el caso del acuífero libre de Doñana queda de manifiesto que la vulnerabilidad nunca varía en más de una categoría en una misma zona.

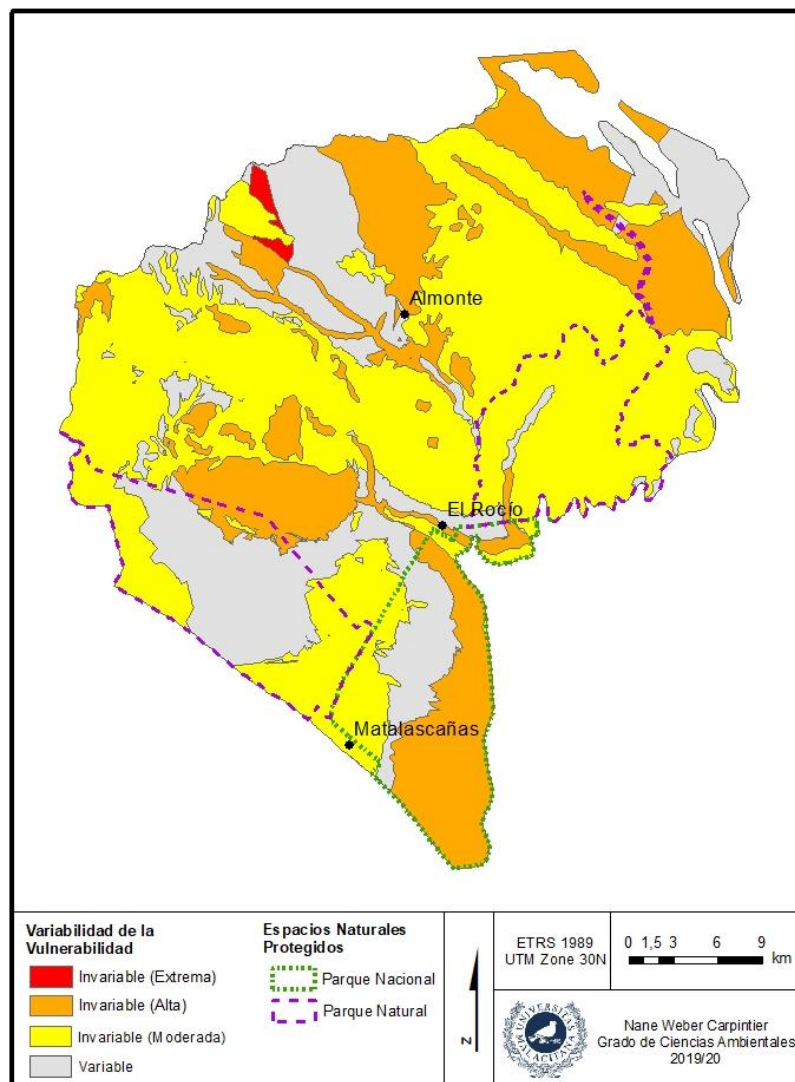


Figura 5. Mapa de la Variabilidad de la Vulnerabilidad del acuífero libre de Doñana a la contaminación de las aguas subterráneas.

5. Discusión

Los mapas de vulnerabilidad del acuífero libre de Doñana se han elaborado a partir de un concepto: La vulnerabilidad depende directamente del tipo de acuífero, de la profundidad del agua subterránea y de la composición litológica. Este concepto es el llamado método GOD (apartado 3). Aunque la intención del presente estudio es evaluar la variación de la vulnerabilidad a lo largo del año, hay que analizar primero la vulnerabilidad del acuífero en sí, es decir, estudiar la vulnerabilidad a escala regional. Los mapas de vulnerabilidad muestran que el acuífero en cuestión presenta un máximo de cuatro clases de vulnerabilidad: vulnerabilidad extrema, alta, moderada y baja. La vulnerabilidad baja se detecta únicamente en el este del área estudiada y depende principalmente de la profundidad del agua subterránea. En general, el agua subterránea a poca profundidad es más susceptible a ser contaminado, ya que está más cerca de las posibles fuentes de contaminación. Cuanta más distancia haya entre la cota del terreno y el nivel del agua subterránea, menor será la probabilidad de que los contaminantes alcancen el nivel freático. En el caso del acuífero libre de Doñana, las zonas de baja vulnerabilidad registran profundidades de aproximadamente 20 – 30 metros. La vulnerabilidad moderada de la zona estudiada depende tanto de la composición litológica, como de la profundidad del nivel piezométrico. En general, se observa que la vulnerabilidad moderada coincide, aunque no siempre, con las zonas de composición litológica procedente del Plioceno (principalmente arenas, y margas) y del Cuaternario (arenas). La litología del Plioceno predomina en el centro del acuífero y cuenta con una permeabilidad media-alta, gracias a la presencia de algunas margas del Mioceno. En cambio, las arenas cuaternarias del sur del acuífero presentan permeabilidades altas. El hecho de que los dos tipos de litología registren la misma clase de vulnerabilidad o no, viene condicionado por la profundidad del agua. Generalmente, se miden profundidades de 5 a 20 metros en el centro del acuífero y profundidades de 10 a 20 metros en el suroeste. Es decir, aunque el agua se encuentre a menor profundidad en el centro que en el suroeste del acuífero, la vulnerabilidad es la misma, ya que los materiales del centro son menos permeables. La permeabilidad del acuífero determina la facilidad con la cual un contaminante se mueve a través de los sedimentos. Mayor permeabilidad implica mayor facilidad para desplazarse. Las vulnerabilidades altas, registradas en la zona estudiada, coinciden generalmente con tres tipos de litología: los materiales pliocuaternarios (arenas), ubicadas en el sur, que miden profundidades bajas del agua subterránea (< 2m); los afloramientos del glacia y los materiales del Mioceno superior. Estos últimos son materiales que, dependiendo de la composición del afloramiento, pueden ser permeables (calizas, calcarenitas, arenas) o semipermeables (arenas, margas). Detectan mayoritariamente profundidades del agua subterránea de 5 a 15 m. Las zonas de vulnerabilidad extrema se ubican en el noroeste y noreste del acuífero libre de Doñana y dependen principalmente de la profundidad del nivel piezométrico. Las mediciones oscilan entre 2 y 5 metros de profundidad que, en medios permeables, proponen una vulnerabilidad muy alta (extrema) a la contaminación de las aguas subterráneas.

Una vez estudiadas las ubicaciones y extensiones de los distintos campos de vulnerabilidad, se puede evaluar la variabilidad de la vulnerabilidad del acuífero a lo largo del año. Los resultados de los mapas

de vulnerabilidad y del mapa de variación de la vulnerabilidad demuestran claramente la existencia de una variación a lo largo del año. Esa variación se debe al único parámetro variable del método GOD, la profundidad del nivel piezométrico (parámetro D). El acuífero se recarga únicamente por la infiltración del agua de lluvia, lo cual significa que la profundidad del agua subterránea está directamente relacionada con la cantidad de lluvia que cae sobre el acuífero. Como se ha mencionado en el apartado de características climáticas, el acuífero se ve afectado por un clima mediterráneo marítimo. En verano, durante los meses de junio, julio y agosto, la precipitación media mensual no supera los 5 mm y, en otoño-invierno, se observan precipitaciones medias mensuales más elevadas, con un máximo de 108,4 mm en el mes de diciembre. La profundidad del agua subterránea no depende únicamente de la cantidad y frecuencia de la lluvia, sino también de las extracciones de agua que son realizadas por el ser humano, sobre todo en los meses de verano. Dichas extracciones pueden contribuir, en cierta medida, al descenso del nivel piezométrico.

Conociendo el régimen pluviométrico, se puede observar un patrón con respecto a la variación de la vulnerabilidad. La vulnerabilidad extrema alcanza su extensión mínima (0,59 % de la superficie total) en el mes de agosto, mientras que las vulnerabilidades bajas y moderadas registran sus extensiones máximas en el mismo mes. Las escasas precipitaciones de los meses de junio, julio y agosto afectan a la disponibilidad del agua subterránea a poca profundidad, disminuyéndola. Debido a este fenómeno, las anteriores zonas de vulnerabilidad extrema pasan a ser zonas de vulnerabilidad alta, ocupando, como consecuencia, extensiones inferiores en el mapa de vulnerabilidad del mes de agosto. El fenómeno no afecta únicamente a las zonas de vulnerabilidad extrema, sino también a las restantes clases de vulnerabilidad. En otras palabras, las extensiones, afectadas por una disminución de la profundidad del agua, bajan en una categoría de vulnerabilidad siempre que lo establecen los criterios del método GOD (tabla 5). En el acuífero libre de Doñana no se han registrado descensos significativos de profundidad, de modo que las clases de vulnerabilidad bajan solamente en una categoría. Durante los meses lluviosos (sobre todo invierno) sucede lo mismo, aunque de manera inversa. Las zonas de vulnerabilidad extrema y alta ganan en superficie por el ascenso del nivel freático, mientras que las zonas de vulnerabilidad moderada y baja disminuyen en superficie.

El mapa de variabilidad de la vulnerabilidad indica concretamente en qué zonas se producen los cambios de vulnerabilidad a lo largo del año, y en cuáles no. Proyecta también la capa de los Espacios Naturales Protegidos (ENP), es decir, el parque nacional y natural de Doñana. Los ENP se distribuyen sobre el sur y sureste del acuífero, protegiendo, entre otros, el Manto Eólico y las zonas pegadas a las marismas de Doñana. Según los mapas de vulnerabilidad, las áreas protegidas presentan dos tipos de vulnerabilidad: moderada y alta. Las zonas colindantes a las marismas en la parte austral presentan una vulnerabilidad alta invariable y las zonas colindantes con las marismas en el sureste registran una vulnerabilidad moderada invariable. El área protegida cercana a la costa atlántica detecta tanto vulnerabilidades invariables como variables. En las zonas de vulnerabilidad variable se alternan la vulnerabilidad moderada y alta según la profundidad del agua subterránea.

6. Conclusión

Tanto los mapas de vulnerabilidad como el mapa de variabilidad de la vulnerabilidad son una clara evidencia de la existencia de una variación de la vulnerabilidad del acuífero libre de Doñana a lo largo del año. Los cambios de vulnerabilidad se producen como consecuencia de un aumento o descenso de la profundidad del agua subterránea, ya que es el único factor que varía. La profundidad cambia en función de la recarga del acuífero, la cual depende únicamente de la infiltración del agua de lluvia que cae sobre el acuífero.

Existe una variación moderada de la vulnerabilidad a lo largo del año, ya que las vulnerabilidades de las zonas nunca varían, es decir bajan o aumentan, en más de una categoría, de modo que los cambios de profundidad del agua subterránea no son significativos.

No obstante, el acuífero libre de Doñana presenta zonas de vulnerabilidad extrema y alta, como las zonas protegidas por el parque nacional y natural de Doñana. El conocimiento de sus extensiones y variaciones a lo largo del año es de gran valor a la hora de gestionar y proteger las aguas subterráneas, de tal modo que sea posible la toma de las medidas preventivas necesarias, tales como el cese y/o vigilancia de actividades potencialmente contaminantes, asegurando la calidad de las aguas subterráneas.

Bibliografía

Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (2015). Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir. Segundo ciclo de planificación: 2015-2021. Retrieved July 8, 2019, from <https://www.chguadalquivir.es/demarcacion-hidrografica-guadalquivir>

Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (2018). Informe de estado de los acuíferos del entorno de Doñana. Año Hidrológico 2016 – 2017. p. 10 – 11. Retrieved July 8, 2019, from http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal_web/servicios_generales/doc_tecnicos/publicaciones_renpa/2018_05_end_memorias_anuales/memorias_anuales/2017_anexo_01.pdf

Food and Agriculture Organization of the United Nations (2017). *Water pollution from agriculture: a global review*. Rome. Retrieved October 23, 2019, from <http://www.fao.org/3/a-i7754e.pdf>

Foster, S. & Hirata, R., (1988) Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO-PAHO/ HPE-CEPIS Technical Manual. Lima, Perú.

Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (2019). Datos Espaciales de Referencia de Andalucía. Información Básica de los Datos. Retrieved August 3, 2019, from https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/DERA/documentos/informacion_basica_de_los_datos_20190708.pdf

Instituto Geológico y Minero de España (2019). Identificación y caracterización de la interrelación que se presenta entre aguas subterráneas, cursos fluviales, descarga por manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial interés hídrico. Demarcación Hidrográfica 051 Guadalquivir. Retrieved July 8, 2019, from http://info.igme.es/SidPDF/147000/994/147994_0000006.pdf

Manzano, M. and Custodio, E. (2005). El acuífero de Doñana y su relación con el medio natural. In: F. Novo, E. Vizcaino and C. Cabrera, ed., *Doñana-Water and Biosphere*. Madrid: Mateu Cromo Artes Gráficas, pp.133 - 142. Retrieved August 1, 2019, from <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/600/adr.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Manzano, M. and Custodio, E. (2007). Las aguas subterráneas en Doñana y su valor ecológico. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 15, 305-316. Retrieved August 1, 2019, from <https://core.ac.uk/download/pdf/39078330.pdf>

Martin, M., López, J., López, L., Mantecón, R., Cantos, R. and Coletto, I. (1992). *Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno*. Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España. pp. 11-18.

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (2019). Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación. Bogotá, Colombia. p.15.

United Nations World Water Assessment Programme (2015). The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. Paris, UNESCO

Vías, J. (2005). Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del sur de España. Málaga: Universidad de Málaga. Servicio de Publicaciones. Tesis Doctoral, 79 – 81.

Vías, J. (2003). Vulnerabilidad y peligro de contaminación en el acuífero carbonatado de Torremolinos (Málaga). Málaga: Centro de Ediciones de la Diputación de Málaga.

Otros:

Infraestructura Científico-Técnica Singular de Doñana. Datos meteorológicos (1995-2017). [Table]. Retrieved July 27, 2019, from <http://icts.ebd.csic.es/datos-meteorologicos>

Junta de Andalucía. Datos Espaciales de Referencia de Andalucía (n.d.). Mapa Geológico-Minero de Andalucía a escala 1:400.000. [shapefile]. Retrieved August 15, 2019, from <https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/DERA/g04.htm>

Red de Información Ambiental de Andalucía (n.d.). Capa de la localización geográfica de los puntos de agua a escala 1:5.000. [shapefile]. Retrieved August 15, 2019, from https://descargasrediam.cica.es/repo/s/RUR?path=%2F04_RECURSOS_NATURALES%2F04_AGUA_S%2F02_SUBTERRANEAS%2FInformacion_General_Aguas_Subterranas%2FInfGeografica%2FInfVectorial%2FShapes

Red de Información Ambiental de Andalucía. Datos piezométricos (2019). [dbf]. Retrieved August 15, 2019, from https://descargasrediam.cica.es/repo/s/RUR?path=%2F04_RECURSOS_NATURALES%2F04_AGUA_S%2F02_SUBTERRANEAS%2FInformacion_General_Aguas_Subterranas%2FInfGeografica%2FInfVectorial%2FShapes

ANEXOS

ANEXO I: REGISTROS PLUVIOMÉTRICOS

RESUMEN PRECIPITACIONES EN DOÑANA (mm)													
	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	TOTAL
94-95	0,0	30,5	78,7	12,8	16,0	90,3	0,2	12,2	0,0	11,7	0,0	0,0	252,4
95-96	0,0	2,7	121,8	312,1	313,0	39,6	52,3	55,5	129,2	0,0	0,0	1,6	1027,8
96-97	60,4	16,5	87,5	425,9	154,7	0,0	0,0	37,8	67,8	33,7	0,0	1,0	885,3
97-98	0,3	61,7	179,9	215,5	90,1	90,4	11,5	23,3	40,6	8,5	0,0	0,0	721,8
98-99	52,2	1,0	23,5	22,2	80,7	3,4	39,0	18,0	8,3	4,4	0,0	0,0	252,7
99-00	19,3	205,1	10,2	21,8	56,2	0,0	22,8	63,7	114,8	0,0	0,0	0,0	513,9
00-01	14,4	28,9	58,8	261,0	153,3	23,2	111,7	0,0	27,6	0,0	1,6	0,0	680,5
01-02	101,1	100,2	76,1	82,1	34,8	6,2	96,0	63,7	0,4	0,0	0,0	0,0	560,6
02-03	59,5	28,4	110,3	128,2	72,4	42,2	44,2	63,9	0,4	0,0	0,0	0,0	549,5
03-04	20,0	215,9	73,5	184,1	11,0	105,1	59,4	41,0	64,9	0,0	0,0	0,0	774,9
04-05	0,5	67,1	18,0	16,5	0,0	39,2	25,7	0,0	2,8	0,0	0,0	0,0	169,8
05-06	0,0	98,8	41,6	8,9	135,5	69,6	48,0	32,2	0,0	28,2	0,0	5,5	468,3
06-07	34,2	180,3	191,9	39,0	81,7	56,8	14,7	34,6	22,4	0,2	0,0	61,1	716,9
07-08	72,8	61,3	66,6	82,9	28,9	58,5	14,5	164,5	6,3	0,0	0,0	0,0	556,3
08-09	36,5	113,2	39,6	49,3	78,7	77,6	40,2	40,6	0,3	0,0	0,0	0,0	476,0
09-10	28,3	16,8	36,0	200,1	171,6	183,5	86,5	36,2	10,3	14,6	0,2	0,1	784,2
10-11	4,8	54,3	107,8	222,81	41,3	56,9	125,5	53,2	44,9	0,0	0,0	1,0	712,51
11-12	34,0	48,0	95,7	10,9	21,0	1,8	48,5	37,8	32,7	0,0	0,0	0,0	330,4
12-13	26,4	119,0	85,9	30,5	47,0	74,5	116,2	45,4	6,0	0,0	0,0	15,2	566,1
13-14	21,1	72,1	0,9	59,4	48,7	59,6	25,4	41,9	18,6	11,3	0,0	0,0	359,0
14-15	38,8	59,8	215,6	53,0	35,9	39,1	46,2	56,9	0,0	3,8	0,0	0,0	549,1
15-16	0,0	96,9	67,9	15,9	63,4	34,4	0,0	48,9	136,0	0,0	1,1	5,0	469,5
16-17	7,0	89,5	125,8	106,6	17,5	55,0	59,3	34,1	15,8	0,0	0,0	1,0	511,6
17-18	0,0	21,5	138,1	38,9	40,0	12,5	185,4	111,6	8,3	4,6	0,0	0,0	560,9
Media	26,3	74,6	85,5	108,4	74,7	50,8	53,1	46,5	31,6	5,0	0,1	3,8	560,4

ANEXO II: MAPA DE ISOPIEZAS

