



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,  
Canales y Puertos.  
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



# Optimización de la ubicación de instalaciones de eliminación de Residuos Municipales (RM) mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Trabajo realizado por:  
***SUSANA SÁNCHEZ GIL***

Dirigido:  
***AMAYA LOBO GARCÍA DE CORTÁZAR***  
***DANIEL JATO ESPINO***

Titulación:  
**Máster Universitario en  
Ingeniería de Caminos, Canales y  
Puertos**

Santander, septiembre de 2017

**TRABAJO FINAL DE MASTER**



## TÍTULO DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER:

### **Optimización de la ubicación de instalaciones de eliminación de Residuos Municipales (RM) mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG)**

**AUTOR:** Susana Sánchez Gil  
**DIRECTORES:** Amaya Lobo García de Cortázar  
Daniel Jato Espino

**CONVOCATORIA:** Septiembre de 2017

## **PALABRAS CLAVE**

Gestión de Residuos Municipales; Análisis multicriterio; Selección de emplazamiento; Sistemas de Información Geográfica; Vertederos.

## **RESUMEN**

El incremento en la producción de Residuos Municipales (RM) en espacios urbanos y la alta ocupación de las instalaciones ya existentes para su eliminación son dos factores que pueden impulsar la necesidad de construir nuevos vertederos. En este contexto, el presente estudio tiene por objeto diseñar una herramienta de análisis espacial multicriterio para optimizar la ubicación de un vertedero de Residuos Municipales (RM) para la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona (Navarra).

En primer lugar, se propone el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para localizar zonas adecuadas para la implantación de vertederos de acuerdo a las restricciones y limitaciones a su ubicación propuestas en el desarrollo del Real Decreto 1481/2001 relativo a las instalaciones de eliminación de residuos, de actual vigencia en el territorio español.

En segundo lugar, se plantea una metodología de análisis multicriterio que combina las técnicas AHP (*Analytic Hierarchy Process*) y TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) para seleccionar la ubicación óptima de entre las zonas adecuadas en función de su impacto económico, social y ambiental. El primero de ellos interviene en la ponderación de los criterios aplicando comparaciones por pares, mientras que el segundo actúa en la valoración de un grupo de propuestas, en función de los tres criterios relacionados con los pilares del desarrollo sostenible.

La metodología empleada se basa en analizar diferentes escenarios en que la preponderancia de los criterios económico, ambiental y social es distinta. Para el cálculo de los subcriterios específicos en que estos se dividen se ha hecho uso de diversas herramientas de edición y zonificación propias de los SIG.

De acuerdo a los resultados obtenidos para la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona (Navarra), la mejor ubicación es aquella que obtiene una puntuación más equilibrada en relación a todos los criterios, gracias a su proximidad a los puntos de mayor generación de residuos, minimizando los costes y emisiones de transporte, y a los reducidos impactos sociales que provoca. Sin embargo, la implementación de actuaciones de mejora, sobre todo en relación al criterio social (mitigar las afecciones a la población), permitiría alcanzar valores más cercanos a la solución ideal teórica en la que se minimizasen los impactos económicos, ambientales y sociales asociados a la construcción de una instalación de vertido.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] MAGRAMA, «RD 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero,» 2013.
- [2] P. Europeo y C. Europeo, «Directiva 2008/98/CE sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas,» 2008.
- [3] MAGRAMA, «Ley de Residuos y Suelos Contaminados,» 2011.
- [4] MAGRAMA, «Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos,» 1998.
- [5] M. del Pozo Manrique, «Selección de emplazamientos para vertederos controlados».
- [6] EPCC, *Sistemas de Información Geográfica aplicados a la ingeniería civil*, 2013.
- [7] V. Olaya, *Sistemas de Información Geográfica*, 2011.
- [8] J. Jensen y E. Christensen, «Solid and hazardous waste disposal site selection using digital geographic information system techniques,» *The Science of the Total Environment*, 1986.
- [9] J. Bosque Sendra, M. Gómez Delgado, V. Rodríguez Espinosa y M. Á. Díaz Muñoz, «Localización de centros de tratamiento de residuos: una propuesta metodológica basada en un SIG,» 1999.
- [10] «Portal de la Dirección General del Catastro,» [En línea]. Available: <http://www.catastro.meh.es/>.
- [11] M. A. y. A. L. Departamento de Desarrollo Rural, «Plan Integrado de Gestión de Residuos de Navarra 2010-2020».
- [12] M. A. y. A. L. Departamento de Desarrollo Rural, «Programa de prevención y Plan de Gestión del Plan de Residuos de Navarra 2017-2027,» 2016.
- [13] MAGRAMA, «Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos,» 2015.
- [14] S. G. d. C. Ambiental, «Desarrollo Técnico del R.D. 1481/2001 relativo a las

- instalaciones de vertido de residuos,» 2003.
- [15] MAGRAMA, «Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas,» 2013.
- [16] M. d. Fomento, «Ley 3/1995, de 23 de marzo, de Vías Pecuarias».
- [17] M. d. Fomento, «Norma de Construcción Sismorresistente,» 2009.
- [18] MAGRAMA, «Ley 4/1989, de 27 de marzo, de Conservación de los Espacios Naturales y de la Flora y Fauna Silvestres».
- [19] A. f. Desktop, «Environmental Systems Research Institute (ESRI),» ESRI: Redlands, CA, USA, 2013.
- [20] «Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra,» [En línea]. Available: <http://idena.navarra.es/Portal/Inicio>.
- [21] «ArcGIS,» [En línea]. Available: <http://doc.arcgis.com/es/arcgis-online/>. [Último acceso: 2016].
- [22] « Instituto Geográfico Nacional,» [En línea]. Available: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>.
- [23] «Instituto Geológico y Minero de España (IGME),» [En línea]. Available: <http://mapas.igme.es/Servicios/default.aspx>.
- [24] Y. Fan, H. Li y G. Miguez-Macho, «Global Patterns of Groundwater Table Depth,» *Science*, pp. 940-943, 2013.
- [25] «MAGRAMA,» [En línea]. Available: <http://www.mapama.gob.es/es/>.
- [26] MAGRAMA, «Precios medios anuales de las tierras de uso agrario,» 2016.
- [27] T. y. C. (. d. N. Departamento de Obras Públicas, «Cartografía Geológica de Navarra 1:25000».
- [28] «<http://ec.europa.eu/>,» [En línea]. Available: <http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/eucostwaste.pdf>.
- [29] «<http://ec.europa.eu/>,» [En línea]. Available: [http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/climate\\_change.pdf](http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/climate_change.pdf).
- [30] «Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios,» [En línea]. Available: <http://sig.mapama.es/siga/>.
- [31] «Meteorología y climatología de Navarra,» [En línea]. Available: <http://meteo.navarra.es/energiasrenovables/maparosavientos.cfm>.
- [32] J. F. Cid Montañés, «Control ambiental y social de los olores en vertederos,» 2002.

- [33] T. Saaty, The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resources allocation, M cGraw-Hill, 1980.
- [34] C. L. Hwang y K. Yoon, «Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications,» *New York: Springer-Verlag*, 1981.



**TITLE:**

**Optimization of the location of Municipal Solid Waste (MSW) disposal facilities using Geographic Information Systems (GIS)**

**AUTHOR:** Susana Sánchez Gil  
**DIRECTORS:** Amaya Lobo García de Cortázar  
Daniel Jato Espino

**CONVOCATORIA:** September 2017

**KEYWORDS**

Waste Management; Multi-criteria Decision Analysis; Site selection; Geographic Information System; Landfill.

**ABSTRACT**

The increase in Municipal Solid Waste (MSW) production in urban spaces and the high occupancy of the current landfills are two factors that may promote the need to build new facilities to dispose waste. In this context, the purpose of the present study is to design a spatial multi-criteria decision support tool that optimizes the location of a MSW landfill for the Comarca of Pamplona Commonwealth in the province of Navarra.

Firstly, the use of Geographic Information System (GIS) is proposed to identify suitable areas for the construction of the new landfill, in accordance with the restrictions and limitations for its location included in the development of the Royal Decree on Landfills 1481/2001 related to waste disposal facilities, currently valid in Spain.

Secondly, a multi-criteria decision analysis methodology is designed to select the optimal location among the suitable areas previously identified, taking into account the combination of a series of economic, environmental and social criteria. In order to obtain a normalized output integrating these three criteria, this study suggests the use of a methodology that combines the AHP (Analytic Hierarchy Process) and TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) methods. The first one is used in the weighting of the criteria applying pairwise comparisons, whilst the second enables the evaluation of a set of proposals, based on the three criteria related to the pillars of sustainable development

The proposed methodology is based on analyzing different scenarios in which the preponderance of the economic, environmental and social criteria varies. GIS editing and zoning tools have been applied to model and calculate the specific subcriteria into which the three main criteria are divided.

According to the results obtained in the study case of the Comarca of Pamplona Commonwealth (Navarra), the best proposal is the one that gets more balanced marks in all the criteria, due to its small social impact and proximity to the waste generation points, which minimizes both the transport costs and the atmospheric emissions. However, there is still room for improvement, especially in relation to the social criteria. The mitigation of the effects on the affected population would lead to achieve closer values to a theoretical ideal solution in which the economic, environmental and social impacts originated by the construction of a new landfill are minimized.

## BIBLIOGRAPHY

- [1] MAGRAMA, «RD 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero,» 2013.
- [2] P. Europeo y C. Europeo, «Directiva 2008/98/CE sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas,» 2008.
- [3] MAGRAMA, «Ley de Residuos y Suelos Contaminados,» 2011.
- [4] MAGRAMA, «Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos,» 1998.
- [5] M. del Pozo Manrique, «Selección de emplazamientos para vertederos controlados».
- [6] EPCC, *Sistemas de Información Geográfica aplicados a la ingeniería civil*, 2013.
- [7] V. Olaya, *Sistemas de Información Geográfica*, 2011.
- [8] J. Jensen y E. Christensen, «Solid and hazardous waste disposal site selection using digital geographic information system techniques,» *The Science of the Total Environment*, 1986.
- [9] J. Bosque Sendra, M. Gómez Delgado, V. Rodríguez Espinosa y M. Á. Díaz Muñoz, «Localización de centros de tratamiento de residuos: una propuesta metodológica basada en un SIG,» 1999.
- [10] «Portal de la Dirección General del Catastro,» [En línea]. Available: <http://www.catastro.meh.es/>.
- [11] M. A. y. A. L. Departamento de Desarrollo Rural, «Plan Integrado de Gestión de Residuos de Navarra 2010-2020».
- [12] M. A. y. A. L. Departamento de Desarrollo Rural, «Programa de prevención y Plan de Gestión del Plan de Residuos de Navarra 2017-2027,» 2016.
- [13] MAGRAMA, «Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos,» 2015.
- [14] S. G. d. C. Ambiental, «Desarrollo Técnico del R.D. 1481/2001 relativo a las instalaciones de vertido de residuos,» 2003.

- [15] MAGRAMA, «Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas,» 2013.
- [16] M. d. Fomento, «Ley 3/1995, de 23 de marzo, de Vías Pecuarias».
- [17] M. d. Fomento, «Norma de Construcción Sismorresistente,» 2009.
- [18] MAGRAMA, «Ley 4/1989, de 27 de marzo, de Conservación de los Espacios Naturales y de la Flora y Fauna Silvestres».
- [19] A. f. Desktop, «Environmental Systems Research Institute (ESRI),» ESRI: Redlands, CA, USA, 2013.
- [20] «Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra,» [En línea]. Available: <http://idena.navarra.es/Portal/Inicio>.
- [21] «ArcGIS,» [En línea]. Available: <http://doc.arcgis.com/es/arcgis-online/>. [Último acceso: 2016].
- [22] « Instituto Geográfico Nacional,» [En línea]. Available: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>.
- [23] «Instituto Geológico y Minero de España (IGME),» [En línea]. Available: <http://mapas.igme.es/Servicios/default.aspx>.
- [24] Y. Fan, H. Li y G. Miguez-Macho, «Global Patterns of Groundwater Table Depth,» *Science*, pp. 940-943, 2013.
- [25] «MAGRAMA,» [En línea]. Available: <http://www.mapama.gob.es/es/>.
- [26] MAGRAMA, «Precios medios anuales de las tierras de uso agrario,» 2016.
- [27] T. y. C. (. d. N. Departamento de Obras Públicas, «Cartografía Geológica de Navarra 1:25000».
- [28] «<http://ec.europa.eu/>,» [En línea]. Available: <http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/eucostwaste.pdf>.
- [29] «<http://ec.europa.eu/>,» [En línea]. Available: [http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/climate\\_change.pdf](http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/climate_change.pdf).
- [30] «Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios,» [En línea]. Available: <http://sig.mapama.es/siga/>.
- [31] «Meteorología y climatología de Navarra,» [En línea]. Available: <http://meteo.navarra.es/energiasrenovables/maparosavientos.cfm>.
- [32] J. F. Cid Montañés, «Control ambiental y social de los olores en vertederos,» 2002.
- [33] T. Saaty, The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resources

allocation, M cGraw-Hill, 1980.

- [34] C. L. Hwang y K. Yoon, «Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications,» *New York: Springer-Verlag*, 1981.



## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Marco normativo .....	2
1.2.	Objetivos del estudio.....	2
1.2.1.	Objetivos generales .....	2
1.2.2.	Objetivos específicos .....	3
1.3.	Conceptos previos .....	3
1.3.1.	Vertedero controlado.....	3
1.3.2.	Sistemas de Información Geográfica (SIG) .....	5
1.3.3.	Análisis multicriterio .....	7
2.	DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL .....	11
2.1.	Situación actual en el territorio de Navarra y alternativas futuras .....	12
2.2.	Solución adoptada en el PIGRN 2017-2027 a la eliminación de residuos.....	17
2.2.1.	Residuos domésticos y comerciales .....	17
2.2.2.	Residuos de construcción y demolición.....	19
2.2.3.	Residuos industriales .....	20
2.2.4.	Resumen de soluciones.....	22
3.	METODOLOGÍA.....	25
3.1.	Requisitos para la ubicación de vertederos controlados.....	26
3.1.1.	Restricciones a la ubicación de vertederos .....	26
3.1.2.	Limitaciones a la ubicación de vertederos.....	28
3.2.	Delimitación de zonas adecuadas con SIG .....	30
3.2.1.	Principales herramientas SIG utilizadas .....	30
3.2.2.	Aplicación de las herramientas SIG a las restricciones y limitaciones.....	35
3.3.	Priorización de zonas.....	38
3.3.1.	Criterios para la toma de decisiones .....	38
3.3.2.	Principales herramientas SIG utilizadas .....	42
3.3.3.	Aplicación de las herramientas SIG en los criterios.....	46
3.3.4.	Análisis multicriterio .....	48
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	53
4.1.	Introducción .....	54
4.2.	Delimitación de zonas adecuadas.....	54
4.3.	Priorización de zonas.....	67

---

4.3.1.	Importancia de los criterios .....	79
4.3.2.	Matriz de decisión .....	80
4.3.3.	Resultados globales.....	82
4.3.4.	Resumen de resultados .....	86
5.	CONCLUSIONES .....	89
	REFERENCIAS .....	91

## LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Jerarquía de residuos según la Directiva 2008/98/CE.....	2
Ilustración 2: Evolución en la composición de la atmósfera de un vertedero controlado [5] .....	4
Ilustración 3: Subsistemas de un SIG .....	6
Ilustración 4: cuadro comparativo de los principales SIG de escritorio [6].....	7
Ilustración 5: Mapa de zonificación de la gestión de residuos (Navarra) .....	12
Ilustración 6: Economía circular .....	13
Ilustración 7: Municipios de la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona .....	14
Ilustración 8: Evolución del depósito de residuos en vertedero Navarra (2012-2014) .	15
Ilustración 9: Vertederos de residuos municipales .....	16
Ilustración 10: Comparativa de la evolución de eliminación de RMB en vertedero (Navarra-España) .....	17
Ilustración 11: Vertederos de residuos industriales .....	21
Ilustración 12: Diagrama de flujo herramienta ASCII to Raster .....	31
Ilustración 13: Diagrama de flujo herramienta Slope .....	31
Ilustración 14: Diagrama de flujo herramienta Buffer .....	31
Ilustración 15: Diagrama de flujo herramienta Clip.....	32
Ilustración 16: Diagrama de flujo herramienta Merge.....	32
Ilustración 17: Diagrama de flujo herramienta Dissolve.....	32
Ilustración 18: Diagrama de flujo herramienta Erase.....	33
Ilustración 19: Diagrama de flujo herramienta Multipart to singlepart .....	33
Ilustración 20: Diagrama de flujo herramienta Extract values to point .....	34
Ilustración 21: Diagrama de flujo herramienta Raster to polygon .....	34
Ilustración 22: Diagrama de flujo herramienta Reclassify .....	34
Ilustración 23: Diagrama de flujo herramienta Feature to point .....	42
Ilustración 24: Diagrama de flujo herramienta Near .....	43
Ilustración 25: Diagrama de flujo herramienta Point distance.....	43
Ilustración 26: Diagrama de flujo herramienta Multiple ring buffer .....	44
Ilustración 27: Diagrama de flujo herramienta Feature to polygon.....	44
Ilustración 28: Diagrama de flujo herramienta Extract by mask.....	45
Ilustración 29: Diagrama de flujo herramienta Observer points .....	45
Ilustración 30: Áreas inestables .....	55
Ilustración 31: Áreas cársticas y cavidades subterráneas .....	56
Ilustración 32: Aguas superficiales, continentales y zonas costeras.....	57
Ilustración 33: Aguas continentales, subterráneas y acuíferos.....	58

Ilustración 34: Zonas húmedas (humedales) .....	59
Ilustración 35: Espacios naturales protegidos .....	60
Ilustración 36: Vías pecuarias .....	61
Ilustración 37: Zonas residenciales, de equipamientos sanitarios o educativos .....	62
Ilustración 38: Seguridad aeroportuaria .....	63
Ilustración 39: Zonas adecuadas para instalación del vertedero .....	64
Ilustración 40: Zonas seleccionadas para el análisis multicriterio.....	66
Ilustración 41: Expropiaciones .....	68
Ilustración 42: Material de cobertura.....	69
Ilustración 43: Coste de transporte de los residuos.....	70
Ilustración 44: Coste de funcionamiento (temperaturas) .....	71
Ilustración 45: Emisiones .....	72
Ilustración 46: Vulnerabilidad de los acuíferos .....	73
Ilustración 47: Proximidad a la Red Natura .....	74
Ilustración 48: Generación de lixiviados (precipitaciones) .....	75
Ilustración 49: Cercanía a núcleos de población .....	76
Ilustración 50: Visibilidad vertederos.....	77
Ilustración 51: Vientos.....	78
Ilustración 52: Valores parciales de Ri de las propuestas .....	82
Ilustración 53: Valores globales de Rj de las 10 propuestas; Escenario 1 .....	83
Ilustración 54: Valores globales de Ri de las propuestas; Escenario 2.....	84
Ilustración 55: Valores globales de Ri de las propuestas; Escenario 3.....	85
Ilustración 56: Valores globales de Ri de las propuestas; Escenario 4.....	86

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Vertederos de residuos domésticos .....	15
Tabla 2: Tendencia en la eliminación de residuos municipales y comerciales .....	18
Tabla 3: Objetivos PIGRN residuos municipales y comerciales y su eliminación en vertedero .....	18
Tabla 4: Objetivos a cumplir eliminación de residuos domésticos y comerciales .....	19
Tabla 5: Objetivos PIGRN RCDs y su eliminación en vertedero .....	20
Tabla 6: Objetivos a cumplir eliminación de RCDs.....	20
Tabla 7: Tendencia de eliminación de residuos industriales en vertedero.....	20
Tabla 8: Soluciones PIGRN 2017-2027 vertederos.....	22
Tabla 9: Limitación distancias vertederos a embalses .....	30
Tabla 10: Criterios y subcriterios tenidos en cuenta en el análisis.....	38
Tabla 11: Valor de los cultivos .....	39
Tabla 12: Valor del material de cobertura .....	39
Tabla 13: Valor según la vulnerabilidad de los acuíferos .....	40
Tabla 14: Valor del subcriterio vientos en función de la distancia al vertedero.....	42
Tabla 15: Escala de comparación de Saaty .....	49
Tabla 16: Escala simplificada.....	49
Tabla 17: Índice de consistencia aleatoria (R.I.).....	50
Tabla 18: Peso de los criterios por escenarios.....	79
Tabla 19: Matriz de comparación criterio económico .....	80
Tabla 20: Matriz de comparación criterio ambiental .....	80
Tabla 21: Matriz de comparación criterio social .....	80
Tabla 22: Peso de los subcriterios .....	80
Tabla 23: Matriz de decisión .....	81
Tabla 24: Resumen del ranking de las alternativas según escenario.....	86



## **1. INTRODUCCIÓN**

## 1.1. Marco normativo

La normativa estatal vigente en materia de eliminación de residuos mediante su depósito en vertedero es el RD 1481/2001 [1]. En cuanto a la normativa europea, destaca la publicación, el 19 de noviembre de 2008, de la Directiva sobre residuos 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo [2]. Esta directiva ha sido traspuesta al ordenamiento español mediante la Ley 22/2011, de 28 de julio, de Residuos y Suelos Contaminados [3].

La citada normativa reafirma la jerarquía de gestión de residuos ya señalada en leyes anteriores [4]. Las opciones de gestión, por orden de prioridades son, la prevención, la preparación para la reutilización, el reciclaje, otros tipos de valorización y la eliminación (ver *Ilustración 1*). Dentro de las opciones de valorización dicha normativa incluye la incineración como tal siempre que las plantas incineradoras cumplan unos mínimos de eficiencia energética [3].



**Ilustración 1:** Jerarquía de residuos según la Directiva 2008/98/CE

En cuanto a la eliminación de residuos, la normativa prima el resto de actividades sobre la eliminación, sin embargo, el depósito de residuos en vertederos seguirá siendo necesario para el depósito final de aquellos residuos no aprovechables. Este hecho unido al incremento en la producción de Residuos Municipales (RM) en espacios urbanos y la alta ocupación de las instalaciones ya existentes para su eliminación, actúan como factores impulsores de la construcción de nuevos vertederos.

## 1.2. Objetivos del estudio

En los siguientes apartados se definen los objetivos generales y específicos que se pretenden alcanzar con el presente estudio.

### 1.2.1. Objetivos generales

Como objetivo general del estudio se pretende elaborar un procedimiento que permita optimizar la ubicación de instalaciones de eliminación de residuos. En primer lugar se utilizarán Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la identificación de zonas

adecuadas para la ubicación de vertederos. Posteriormente, se realizará un análisis multicriterio de estas zonas válidas, combinando indicadores económicos, ambientales y sociales para escoger finalmente la alternativa más idónea.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

En base al objetivo general anteriormente definido, como objetivos específicos se citan los siguientes:

- a) Validación de la metodología mediante su aplicación a un caso de estudio (Mancomunidad de la Comarca de Pamplona).
- b) Identificación de los factores más restrictivos a la hora de encontrar zonas adecuadas para la ubicación de vertederos.
- c) Planteamiento de actuaciones de mejora para conseguir soluciones más sostenibles en función de los resultados obtenidos.

### **1.3. Conceptos previos**

Como punto de partida para el desarrollo de este trabajo, en este apartado se describe la terminología asociada al mismo, tanto a nivel de gestión de residuos como de las herramientas analíticas utilizadas.

#### **1.3.1. Vertedero controlado**

Un vertedero controlado, es una instalación destinada a la disposición de residuos sobre el terreno para su eliminación y posterior cobertura con tierra compactada [5]. El vertedero requiere de técnicas para evitar y minimizar los siguientes riesgos sobre el medio en que se encuentra:

- a) Contaminación de las aguas superficiales o subterráneas.
- b) Formación de polvo y arrastre de residuos ligeros.
- c) Propagación de gases contaminantes o molestos.
- d) Acceso de animales a los residuos.
- e) Iniciación y propagación de incendios.

Parte de dicho control se ejerce mediante instalaciones adecuadas. Debido a que los residuos persisten indefinidamente una vez colocados, se requiere un control ilimitado en el tiempo que ha de obtenerse mediante un emplazamiento correcto. A continuación se citan las principales ventajas e inconvenientes de este tipo de instalaciones:

- 1) Ventajas: economía, versatilidad, sencillez técnica y altos niveles de seguridad si está bien proyectado.
- 2) Inconvenientes: elevado consumo de terreno, no se aprovechan los recursos contenidos en los residuos, importante rechazo social y persistencia de los riesgos en el tiempo.

Desde el momento del vertido, hasta décadas tras su clausura, en el vertedero se experimentan los siguientes procesos físicos, químicos y biológicos cuyo conocimiento es indispensable para la selección de su emplazamiento [5]. Para evitar daños en el medio ambiente ocasionados por el vertedero, deben aplicarse varios criterios de ubicación relacionados con las condiciones hidrogeológicas y climáticas del entorno. Los procesos son los siguientes:

- a) Asentamientos provocados por la disminución en el volumen de los residuos (sobre todo la materia orgánica). El 90% del asentamiento se produce en los 5 primeros años pero el proceso continúa más lentamente durante décadas.
- b) Procesos derivados de las altas temperaturas: las temperaturas elevadas durante la descomposición aerobia (en presencia de aire) originan costras que dificultan la implantación de vegetación.
- c) Procesos físicos derivados de agentes ambientales: procesos erosivos tanto hidráulicos como eólicos.
- d) Descomposición de la materia orgánica: es uno de los procesos más importantes que se producen en el interior de un vertedero. Su efecto más destacado es la emisión de gases (metano, sulfhídrico, monóxido de carbono, hidrógeno y sustancias volátiles). Se divide en las cinco etapas que aparecen en la [Ilustración 2](#), con duraciones muy variables. Con la descomposición se produce la acidificación, que incrementa la movilidad de algunos contaminantes, emisión de metano y emisión de malos olores.
- e) Producción de lixiviados: es el proceso con mayor riesgo ambiental y sanitario. Entre las sustancias que contienen los lixiviados pueden citarse metales como hierro, cobre y zinc, además de sales, nitratos, carbonatos, metano, etc.

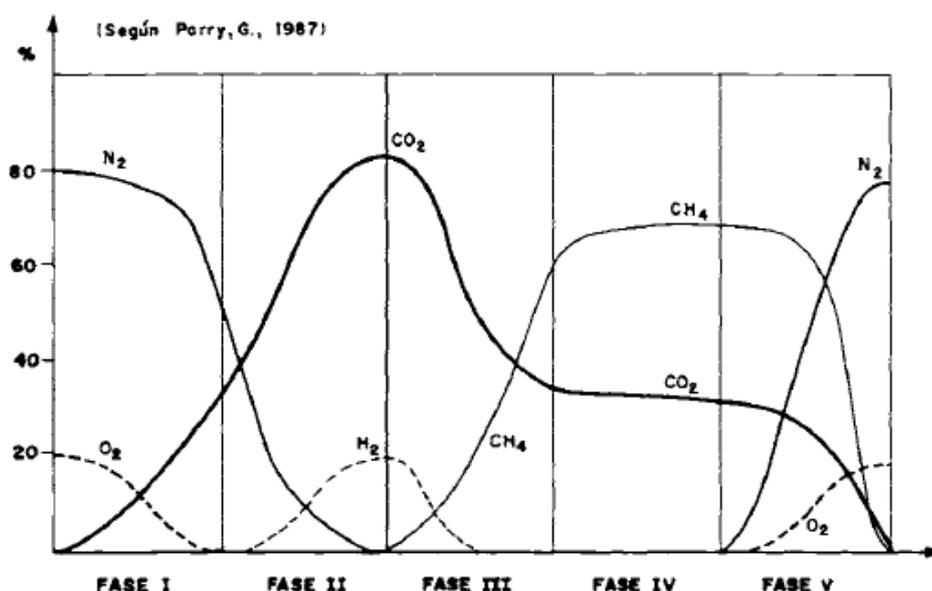


Ilustración 2: Evolución en la composición de la atmósfera de un vertedero controlado [5]

## **1.3.2. Sistemas de Información Geográfica (SIG)**

### **1.3.2.1. Definición**

Un Sistema de Información Geográfica (también conocido con los acrónimos SIG en español o GIS en inglés) es un conjunto de herramientas que integra y relaciona diversos componentes (usuarios, hardware, software, y procesos) que permiten la organización, almacenamiento, manipulación, análisis y modelización de grandes cantidades de datos procedentes del mundo real y vinculados a una referencia espacial (georeferenciados), facilitando la incorporación de aspectos socio-culturales, económicos y ambientales que conducen a la toma de decisiones de una manera más eficaz [6].

Aproximadamente, un 70% de la información que se maneja en cualquier tipo de disciplina está georeferenciada y por tanto viene acompañada de otra información adicional relativa a su localización [7]. Los SIG permiten trabajar con dicha información georeferenciada.

Hay que señalar que no todas las tecnologías que hacen uso de información geográfica son SIG. A continuación se muestran las diferencias entre SIG y CAD (diseño asistido por computadora, Computer-Aided Design en inglés), que es la otra gran herramienta informática para modelar datos espaciales.

- a) El propósito del SIG es reflejar la realidad, mientras el de CAD es diseñar algo que no existe todavía.
- b) En un SIG se le da más importancia a la gestión de datos y en CAD a la parte visual.
- c) El volumen de datos de un SIG es mayor.
- d) Hay tipos de datos de un SIG que un CAD no puede manejar.

Desde otro punto de vista, un SIG puede verse como una entidad formada por tres subsistemas principales, tal y como se representa en la [Ilustración 3](#).

- a) Subsistema de datos (S.D.): se encarga de operaciones de entrada y salida de datos. Permite a los otros subsistemas tener acceso a los datos y realizar sus funciones en base a ellos.
- b) Subsistema de visualización (S.V.): crea representaciones a partir de los datos, permitiendo la interacción con ellos.
- c) Subsistema de análisis (S.A.): contiene los métodos y procesos para el análisis de los datos geográficos.



**Ilustración 3:** Subsistemas de un SIG

El concepto clásico de un SIG es el de una aplicación completa en la cual se implementan herramientas para llevar a cabo las tareas básicas del trabajo con datos geográficos: creación o edición, manejo y análisis. La [Ilustración 4](#) muestra las capacidades de los principales SIG de escritorio actuales en relación a estas tareas [\[6\]](#), que se basan en las siguientes funciones básicas:

- a) Entrada y salida de datos: la implementación de las capacidades de entrada y salida es muy variable entre unos SIG y otros. Algunas aplicaciones tienen únicamente capacidades de abrir archivos, pero no de acceder a servicios remotos, mientras que otras pueden acceder a todo tipo de orígenes de datos.
- b) Visualización: la gran mayoría de las herramientas de escritorio incluyen un gran número de elementos para representar los datos geográficos con los que se trabaja. La forma de operar con los elementos de visualización es muy similar entre distintos SIG.
- c) Edición: la información contenida en una capa es susceptible de ser corregida o modificada y las funciones que permiten estas tareas son importantes para dotar al SIG de versatilidad.
- d) Análisis: la tendencia actual en los SIG es considerar las capacidades de análisis como herramientas modulares que se ejecutan sobre una plataforma base, la cual comprende las capacidades de visualización y salida de datos.
- e) Generación de cartografía: los SIG están dotados de esta capacidad por la necesidad general que aún existe de apoyarse en esa clase de documentos para poder incorporarlos a proyectos o estudios como parte de anexos cartográficos.

	ArcGIS	Idrisi	E.Imagine	Manifold	Geomedia	G.Earth	GRASS	SAGA	O.JUMP	uDig	gvSIG	QGIS
Lectura ráster	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
Lectura vectorial	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
Escritura ráster	◇	◇	◇	◇	◇	-	◇	◇	-	-	◇	◇
Escritura vectorial	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
Conexión BBDD	◇	-	-	◇	◇	-	◇	◇	-	◇	◇	◇
Edición vectorial	◇	-	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
Análisis vectorial	◇	◇	-	◇	◇	-	◇	◇	◇	-	◇	◇
Análisis ráster	◇	◇	◇	◇	◇	-	◇	◇	◇	-	◇	◇
Servicios mapas	◇	-	-	-	◇	◇	◇	-	-	-	◇	-
Datos remotos	◇	-	-	-	◇	-	◇	-	-	-	◇	-

Ilustración 4: cuadro comparativo de los principales SIG de escritorio [6]

### 1.3.2.2. Utilidad para el estudio

Uno de los problemas a los que se enfrenta la gestión de residuos es el de encontrar lugares idóneos para la ubicación de sus instalaciones. Esto no es debido solamente a que se tengan que cumplir un gran número de requisitos técnicos y medioambientales, sino también a la dificultad que conlleva encontrar y procesar la información. Este segundo problema se ha resuelto con la ayuda de los SIG cuyo uso permite georreferenciar datos y elaborar una herramienta de apoyo a la toma de decisiones.

El primer ejemplo de aplicación de estas herramientas al campo de los residuos, tuvo por objetivo la ubicación de un vertedero de residuos peligrosos en el sudeste de EEUU [8]. En España, en los últimos años se ha generalizado mucho su uso destacando el sistema de localización de vertederos para la Comunidad de Madrid diseñado por J. Bosque Sendra y su grupo de colaboradores [9].

### 1.3.3. Análisis multicriterio

#### 1.3.3.1. Definición

El análisis multicriterio es un instrumento que se utiliza para evaluar diversas posibles soluciones a un determinado problema, considerando un número variable de criterios. Tiene como finalidad apoyar la toma de decisiones en la selección de la solución más conveniente.

En términos analíticos, el objetivo de un análisis multicriterio es evaluar un grupo de alternativas posibles a un problema  $A_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) en base a sus puntuaciones  $r_{ij}$  en relación con diversos criterios  $C_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ). La interacción entre los dos conjuntos de elementos se expresa comúnmente en forma de matriz de decisión  $M_{mn}$ :

$$\begin{array}{c|cccc}
 & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\
 \hline
 A_1 & r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\
 A_2 & r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 A_m & r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn}
 \end{array} \quad (1)$$

Los pasos para resolver problemas de análisis multicriterio consisten en determinar los pesos  $w_j$  de los criterios fijados para dar mayor o menor importancia a los aspectos que caracterizan el proceso de decisión, y después evaluar las alternativas en función de sus puntuaciones en relación a los criterios ponderados para obtener una clasificación que indique su grado de preferencia. Dado que los criterios suelen tener diferentes unidades de medida, una operación previa a su ponderación es la normalización de la matriz de decisión, de modo que las calificaciones  $r_{ij}$  para el criterio  $C_j$  se convierten en  $r'_{ij}$  después de ser normalizadas. Por tanto, la matriz de decisión normalizada a partir de la cual se evalúan las alternativas se obtiene a partir de la sustitución de los términos  $r_{ij}$  en la ecuación (1) por sus pesos normalizados ponderados  $v_{ij}$ :

$$v_{ij} = w_j \cdot r'_{ij} \quad (2)$$

### 1.3.3.2. Métodos

Los principales métodos de evaluación y decisión multicriterio discretos se definen a continuación.

#### Métodos basados en la distancia

Estos métodos se basan en el principio de que la alternativa preferida para un problema de análisis multicriterio no solo se caracteriza por estar a la distancia más corta de la Solución Ideal Positiva (PIS), sino también a la distancia mayor de la solución ideal negativa (NIS). Gestionar la dualidad de estos dos conceptos no es una cuestión trivial, ya que la alternativa más cercana a la PIS no es necesariamente la más alejada de la NIS.

Los métodos TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) y VIKOR en serbio (Multi-criteria Optimization and Compromise Solution) son los métodos más representativos de esta familia.

#### Utilidad / Métodos de valoración

Esta familia de métodos de evaluación busca seleccionar la alternativa más preferida de un grupo, en función del grado de satisfacción que proporciona en relación con un conjunto de criterios en conflicto. Las funciones que convierten las puntuaciones originales que representan el comportamiento de las alternativas a través de los criterios en su grado de satisfacción varían dependiendo del método (utilidad o valor).

Estas funciones pueden adoptar diversas formas para modelar los diferentes patrones en las relaciones entre las puntuaciones y el grado de satisfacción que producen.

Dos de los métodos más conocidos dentro de este grupo son MAUT (Multi-Attribute Utility Theory) y MAVT (Multi-Attribute Value Theory).

### Relaciones de Superación

La filosofía de los métodos de superación consiste en construir una relación de preferencia sobre un conjunto de alternativas que indica el grado de dominio de una alternativa sobre otra. Estos métodos pueden tratar la imprecisión y la información incompleta y su aplicación da lugar a una clasificación de preferencias parciales de las alternativas, en lugar de una medida cardinal de sus relaciones de preferencia.

Los métodos más representativos de este grupo son ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité) y PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHOD for Enrichment Evaluation).

### Métodos de calificación

Este grupo incluye todos los métodos que no se encuadran dentro de las categorías anteriormente definidas. Sus fundamentos consisten en la aplicación de operaciones aritméticas básicas en la matriz de decisión para obtener una evaluación global de las alternativas en relación con el conjunto de criterios de evaluación. Se trata de métodos bastante simples, pero con más limitaciones en comparación con los métodos de las otras familias.

SAW (Simple Additive Weighting) es el método más antiguo de este grupo y uno de los más utilizados debido a su facilidad de aplicación. Otro método conocido de este grupo es COPRAS (COMplex PROportional ASsessment method).



## **2. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL**

## 2.1. Situación actual en el territorio de Navarra y alternativas futuras

La Comunidad Foral de Navarra, con una población censada de 637.002 habitantes a fecha de 1 de enero de 2016 [10], está zonificada en relación con la gestión de los residuos domésticos en 15 mancomunidades y un Ayuntamiento (ver [Ilustración 5](#)), encontrándose entre éstas la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona (verde oscuro) con una población censada de 351.568 habitantes [10].



Ilustración 5: Mapa de zonificación de la gestión de residuos (Navarra)

El Plan Integrado de Gestión de Residuos de Navarra 2010-2020 fue declarado nulo por sentencia del Tribunal supremo de 16 de enero de 2015, al haberse emitido la Declaración de Incidencia Ambiental fuera del plazo legalmente establecido y por no incluir la existencia de un mapa que señalase el emplazamiento de algunas instalaciones, conforme a lo establecido en la ya derogada Ley 10/1998 de Residuos y que sin embargo todavía estaba vigente en el momento de aprobación del PIGRN [11].

En consecuencia de todo lo anterior, el Departamento de Desarrollo Rural, Medio Ambiente y Administración Local (DDRMA y AL) ha trabajado en la elaboración de un nuevo Plan Integrado de Gestión de Residuos de Navarra con un horizonte 2016-

2025, el cual queda enmarcado y sustentado jurídicamente por la normativa vigente en materia de residuos, a nivel europeo, estatal y autonómico.

Basado en los principios de la economía circular (ver [Ilustración 6](#)), este plan pretende convertir a Navarra en una sociedad de referencia en la prevención-reducción de la generación de residuos, el liderazgo de la gestión pública y la capacidad para la generación de empleo de calidad.



**Ilustración 6:** Economía circular

Durante el 2016, se ha desarrollado la mayor parte del trabajo de redacción y participación del Plan. Paralelamente, se ha tramitado la Evaluación Ambiental Estratégica. A finales de agosto se redactó la versión inicial del Plan de Residuos y el Estudio Ambiental Estratégico que deben ser sometidos a exposición pública mediante su publicación en el Boletín Oficial de Navarra. A partir de entonces se finaliza con la aprobación y formulación de la Declaración Ambiental Estratégica por parte del Gobierno de Navarra, su publicación en el Boletín de Navarra, su remisión al Parlamento de Navarra y al Ministerio de Alimentación, Agricultura y Medio Ambiente.

El horizonte inicial previsto para el Plan (2015-2025), se ha visto superado por la extensión de todo el proceso realizado, lo que ha provocado que el ámbito actual del Plan se adapte al periodo 2017-2027, tal y como se indica actualmente en la versión inicial del mismo [\[12\]](#).

El transporte (antes de recogida) y tratamiento de los residuos domésticos y comerciales es responsabilidad de las entidades locales, quienes a excepción del ayuntamiento de Baztán, tienen delegada la competencia en las mancomunidades. El transporte se realiza mediante 16 entidades de gestión que actúan de manera independiente [\[12\]](#).

En relación a la transferencia y tratamiento de los residuos, el ayuntamiento de Baztán y las mancomunidades, a excepción de la mancomunidad de la Comarca de Pamplona, están agrupadas en un Consorcio de residuos. La Mancomunidad de la

Comarca de Pamplona se encarga directamente de la recogida y del tratamiento en alta.

La Mancomunidad de la Comarca de Pamplona es la más grande de las 15 mancomunidades de Navarra en cuanto a población se refiere abarcando un total del 55,2% de la Comunidad Autónoma y por tanto es donde mayor cantidad de residuos se deben gestionar. La mancomunidad la conforman 50 municipios que aparecen en la [Ilustración 7](#).



**Ilustración 7:** Municipios de la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona

En Navarra existen en la actualidad 7 vertederos de residuos no peligrosos (RNP), en dos de los cuales solo se depositan los residuos generados de las propias empresas y 6 de residuos inertes.

Los tipos de residuos vertidos dentro de la categoría de vertedero de RNP son: municipales, residuos no peligrosos industriales y fibrocemento (en vertedero RNP con celda específica). Los vertidos en vertederos de inertes son: RCD y Materiales Naturales de Excavación (MNE). La evolución de la cantidad vertida de estos tipos de residuos en los últimos años se muestra en la [Ilustración 8](#).

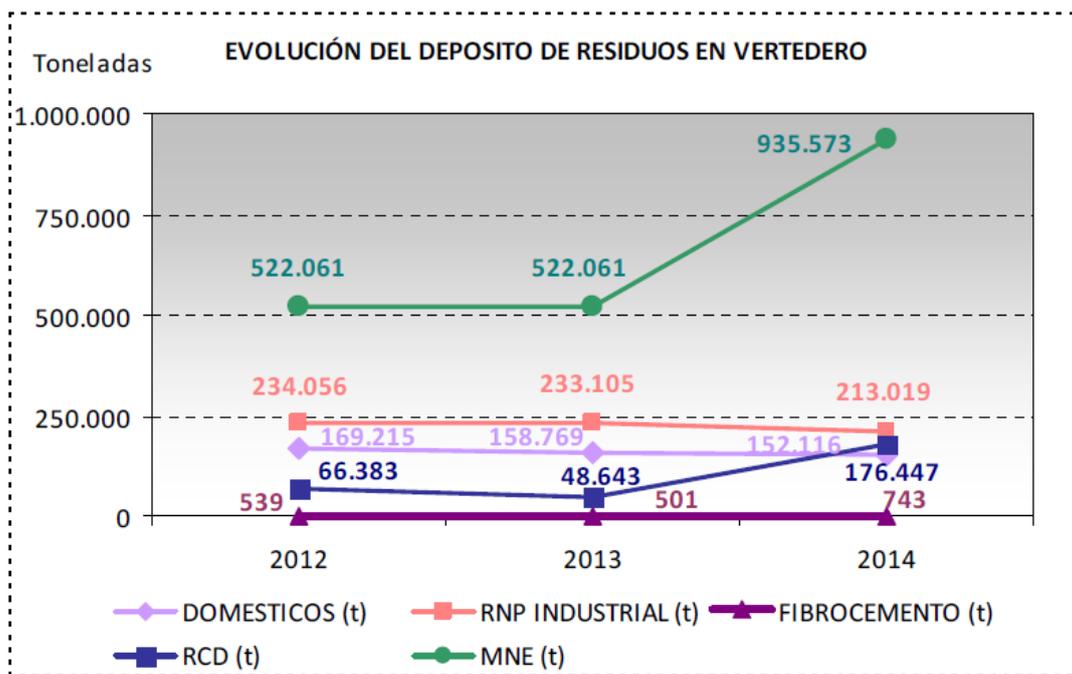


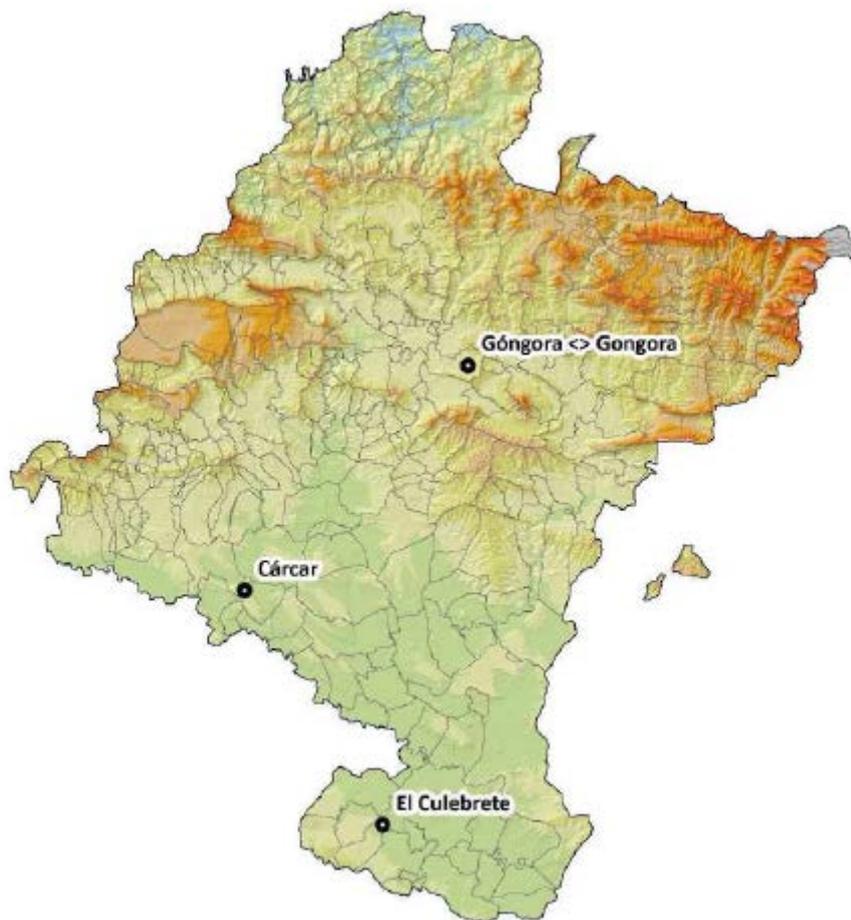
Ilustración 8: Evolución del depósito de residuos en vertedero Navarra (2012-2014)

No se observan grandes cambios en la evolución de la cantidad vertida, excepto en RCD y MNE, debido principalmente a que se han recibido residuos de fuera de Navarra. De estos 7 vertederos 3 son de eliminación de residuos municipales (ver [Tabla 1](#)).

Tabla 1: Vertederos de residuos domésticos

Mancomunidad	Localidad	Tipo de planta	Tipo de residuo tratado	Entradas 2014 (t)
Pamplona	Góngora	Vertedero	FR Rechazos de plantas Voluminosos Limpieza viaria	98.297
Montejurra	Cárcar	Vertedero	Recogida en masa Voluminosos Rechazos plantas Bioestabilizado	11.609
Ribera	Tudela	Vertedero	FR Voluminosos Bioestabilizado Rechazos plantas	41.297

El vertedero de Góngora recibe la Fracción Resto (FR) sin un tratamiento previo. Esto provoca que el porcentaje de Residuos Municipales Biodegradables (RMB) en vertedero sea de un 61%, incumpliendo el objetivo legal de RMB en vertedero [13]. En el PIGRN se contempla la instalación de una nueva planta para el tratamiento de la FR de la Mancomunidad de Pamplona. La ubicación de las instalaciones actuales de eliminación aparece en la [Ilustración 9](#).



**Ilustración 9:** Vertederos de residuos municipales

De los 3 vertederos existentes para residuos domésticos, Cárcar y Ribera están cercanos a agotar su capacidad remanente. Góngora tiene, conforme a un convenio establecido entre el Ayuntamiento de Aranguren y la MCP, una fecha de clausura prevista para 31/12/2022, aunque su capacidad remanente es todavía del 38%. Esta circunstancia implica la necesidad de un vertedero para recibir los rechazos procedentes del tratamiento de la FR. En el PIGRN (2017-2027) se realiza un estudio de alternativas al vertido de estos tipos de residuos que se comentará más adelante.

En lo referente al cumplimiento de los objetivos del PEMAR de reducción de residuos municipales biodegradables RMB, la cantidad de residuos municipales biodegradables destinados a vertedero ha ido descendiendo progresivamente conforme se ha aplicado tratamiento a la fracción resto, fracciones de residuos con contenido en materia orgánica y biorresiduos recogidos selectivamente. Comparando su evolución con el resto de España (ver [Ilustración 10](#)), se aprecia que se produce su reducción a un ritmo más rápido pero no suficiente para dar cumplimiento a los objetivos intermedios establecidos [13].

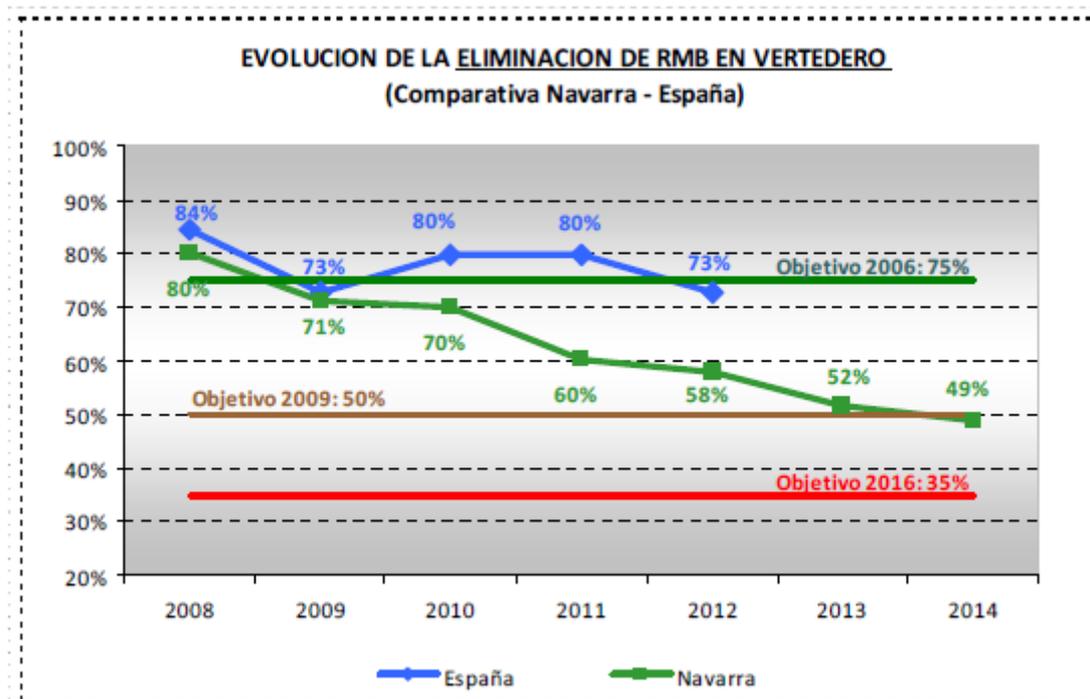


Ilustración 10: Comparativa de la evolución de eliminación de RMB en vertedero (Navarra-España)

## 2.2. Solución adoptada en el PIGRN 2017-2027 a la eliminación de residuos

El PIGRN 2017-2027 pretende la minimización de la eliminación como último escalón de la jerarquía de residuos. Su objetivo es por tanto, minimizar u optimizar este tipo de gestión a favor de la prevención, preparación para la reutilización, reciclaje o valorización [12].

Por otra parte, para alcanzar los objetivos legales de preparación para la reutilización y reciclado, resulta imprescindible limitar el porcentaje de residuos destinados a eliminación. Navarra destina todavía, conforme a los datos de 2014, un 58% de los residuos municipales a eliminación en vertedero [12].

El Plan contempla como objetivo estratégico reducir al máximo el depósito de residuos en vertedero, especialmente los reciclables, evitando que llegue residuo no tratado, lo que significa, vertido directo cero.

### 2.2.1. Residuos domésticos y comerciales

El Plan 2017-2027, acorde con la jerarquía en la gestión de residuos (ver Ilustración 1) establecida en la Ley 22/2011, pretende reducir al máximo el depósito de residuos en vertedero especialmente los valorizables y establece las medidas para ello. Por último, se ve necesaria la implantación de un canon de vertido de residuos, conforme a una Ley Foral de medidas fiscales en materia de residuos. La línea de tendencia de la eliminación de residuos domésticos y comerciales en vertedero se prevé descendente de acuerdo a la Tabla 2.

**Tabla 2:** Tendencia en la eliminación de residuos municipales y comerciales

<b>Año</b>	<b>Residuos domésticos y comerciales a eliminación (toneladas)</b>
2014	151.792
2015	144.970
2016	138.147
2017	131.325
2018	124.502
2019	117.680
2020	110.857
2021	104.035
2022	97.212
2023	90.390
2024	83.567
2025	76.745
2026	69.922
2027	63.100

### 2.2.1.1. *Objetivos, medidas y acciones*

Los principales objetivos, medidas y acciones contra la eliminación de residuos en vertederos para residuos domésticos y comerciales, del nuevo plan 2017-2027 se representan en la [Tabla 3](#) y [Tabla 4](#).

**Tabla 3:** Objetivos PIGRN residuos municipales y comerciales y su eliminación en vertedero

<b>Objetivo</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Medidas</b>
<b>Vertido cero de residuos reciclables</b>	Cantidad de residuos reciclables destinados a eliminación en vertedero, respecto a la cantidad de residuos reciclables generados (%)	Destinar a valorización los residuos reciclables
<b>Cumplimiento de los procesos de admisión de residuos en vertedero</b>		Seguimiento y control
<b>Avanzar en la estrategia de reducción de vertido de residuos biodegradables</b>	Cantidad de residuos municipales biodegradables destinados a vertedero, respecto al total de los generados en 1995 (%)	Destinar a recogida selectiva los residuos biodegradables
<b>Evitar que llegue a vertedero residuo no tratado, esto es, vertido directo cero</b>	Cantidad de residuos domésticos eliminados sin tratamiento previo en vertedero, respecto al total de residuos domésticos generados (%)	Seguimiento, inspección y control
<b>Reducir al máximo el depósito de residuos en vertedero</b>	Cantidad de residuos domésticos y comerciales eliminados en vertedero, respecto al total generado (%)	Avanzar en el cálculo de los costes de gestión de las operaciones de eliminación en vertedero Avanzar en la fiscalidad de las operaciones de eliminación en vertedero

**Tabla 4:** Objetivos a cumplir eliminación de residuos domésticos y comerciales

Flujo de residuos	Objetivos	2010	2014	Evolución	Objetivo		
					2016	2020	2027
Residuos domésticos y comerciales	Avanzar en la estrategia de reducción de vertido de residuos biodegradables	70%	49%	-21%	35%		5%
	Evitar que llegue a vertedero residuo no tratado, vertido directo cero	71%	65%	-6%		0%	
	Reducir al máximo el depósito de residuos en vertedero	71%	58%	-13%		35%	25%

### 2.2.1.2. Infraestructuras

En relación a las infraestructuras de eliminación, el Plan 2017-2027 contempla mantener los vertederos existentes con las siguientes particularidades:

- a) Vertederos de Cárcar y Culebrete: se aprovecharán hasta final de su vida útil, en base a un análisis exhaustivo de su capacidad remanente a realizar antes de 2020. Se contempla además su posible ampliación, pendiente de un análisis de compatibilidad con lugares de protección ambiental a realizar en los primeros años de vigencia del Plan.
- b) Vertedero de Góngora: pese a que su capacidad remanente permitiría su utilización más allá del horizonte del Plan, se contempla respetar el convenio existente entre la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona y el Ayuntamiento del Valle de Aranguren, por lo que tan solo se dispondrá de este vertedero como infraestructura de eliminación hasta el fin del convenio citado.

El plan no contempla nuevas infraestructuras de eliminación, ante el descenso progresivo de la fracción destinada a eliminación, la capacidad remanente de las infraestructuras existentes y sus posibles ampliaciones. No obstante, podría habilitarse un nuevo vertedero, de pequeño tamaño, en la Comarca de Pamplona, al suponer más de la mitad de población de Navarra, evitando el transporte asociado hacia otras zonas de vertido.

### 2.2.2. Residuos de construcción y demolición

El Plan 2027 contempla el vertido cero de residuos de construcción y demolición inertes valorizables y limitar la eliminación de residuos de construcción y demolición no inertes en vertederos de residuos no peligrosos.

### 2.2.2.1. *Objetivos, medidas y acciones*

Los principales objetivos, medidas y acciones contra la eliminación de residuos en vertederos para residuos de construcción y demolición, del nuevo plan 2017-2027 se representan en la [Tabla 5](#) y [Tabla 6](#).

**Tabla 5:** Objetivos PIGRN RCDs y su eliminación en vertedero

Objetivo	Indicadores	Medidas
<b>Limitar la eliminación en vertedero de RNP de RCDs no inertes</b>	Cantidad de RCDs no inertes destinados a eliminación en vertedero, respecto al total de RCDs no inertes generados (%)	Destinar a valorización los residuos no peligrosos de residuos de construcción que no sean inertes
<b>Evitar el vertido directo de residuos inertes</b>	Cantidad de RCDs inertes destinados a eliminación en vertedero, respecto al total de RCDs inertes generados (%)	Avanzar en el tratamiento de los residuos inertes
<b>Limitar la eliminación en vertedero</b>	Cantidad de MNEs destinadas a eliminación en vertedero, respecto al total de MNEs generadas (%)	Avanzar en la utilización de las tierras de excavación

**Tabla 6:** Objetivos a cumplir eliminación de RCDs

Flujo de residuos	Objetivos	2010	2014	Evolución	Objetivo		
					2016	2020	2027
<b>RCDs</b>	Limitar la eliminación en vertedero de RNP de RCDs no inertes	n/d	n/d	-		30%	
	Evitar el vertido directo de residuos inertes	87%	72%	-15%	0% a 31/12/2016		
<b>MNEs</b>	Limitar la eliminación en vertedero	n/d	81%	-		10%	

### 2.2.2.2. *Infraestructuras*

El Plan 2017-2027 no contempla nuevas instalaciones, ante el descenso progresivo de la fracción destinada a eliminación, la capacidad remanente de las infraestructuras existentes y sus posibles ampliaciones.

### 2.2.3. *Residuos industriales*

La tendencia de la eliminación de residuos industriales en vertedero tiende a la estabilización, analizando los datos de entrada a vertedero 2008-2014 (ver [Tabla 7](#)).

**Tabla 7:** Tendencia de eliminación de residuos industriales en vertedero

Industriales	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017 en adelante
<b>Góngora</b>	58.428	67.675	46.398	32.169	28.380	26.330	21.921	20.961	20.000	20.000
<b>Cárcar</b>	7.681	8.500	4.629	7.465	8.017	7.612	5.714	5.500	5.500	5.500
<b>Ribera</b>	56.322	53.424	51.125	41.449	34.256	31.347	30.124	30.000	30.000	30.000
<b>Sakana</b>	9.081	8.095	6.049	10.572	12.420	7.537	8.443	7.000	7.000	7.000
<b>Total</b>	131.512	137.694	108.201	91.655	93.072	72.827	66.201	63.461	62.500	62.500

### 2.2.3.1. Infraestructuras

En relación a las infraestructuras de eliminación de residuos industriales disponibles actualmente son (ver [Ilustración 11](#)):

- Vertedero de Góngora (RNP) (Mancomunidad de la Comarca de Pamplona).
- Vertedero Arbizu (RNP) (Mancomunidad de Sakana). Recibe en exclusiva residuos industriales. Su fin de vida útil está previsto para 31/12/2017.
- Vertedero Cárcar (RNP) (Mancomunidad de Montejurra). Este vertedero está emplazado en un Lugar de Importancia Comunitaria (LIC).
- Vertedero Culebrete (RNP) (Mancomunidad de Ribera).
- Vertedero Dionisio Ruiz (Gestión privada).



**Ilustración 11:** Vertederos de residuos industriales

El Plan 2017-2027 contempla estas mismas instalaciones para la eliminación de residuos industriales con las siguientes particularidades:

- Vertedero de Arbizu: pese a que el fin de su vida útil está previsto para 31/12/2017, ya hay un nuevo vertedero en proyecto, que estará habilitado en 2017, con una vida útil de 8 años.
- Vertederos de Cárcar y Culebrete: se aprovecharán hasta el final de su vida útil, en base a un análisis exhaustivo de su capacidad remanente. Se contempla su posible ampliación, pendiente de un análisis de compatibilidad con lugares de protección ambiental en los primeros años de vigencia del Plan.
- Vertedero de Góngora: pese a que su capacidad remanente permitiría su utilización más allá del horizonte del Plan, se contempla respetar el convenio existente entre la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona y el Ayuntamiento del Valle de Aranguren, por lo que tan solo se dispondrá de este vertedero como infraestructura de eliminación hasta el fin de convenio citado.

#### 2.2.4. Resumen de soluciones

En la [Tabla 8](#) se resumen las soluciones dadas en el PIGRN 2017-2027 para los vertederos existentes en la Comunidad Foral de Navarra y la posibilidad de nuevas instalaciones de eliminación.

**Tabla 8:** Soluciones PIGRN 2017-2027 vertederos

Vertedero	Residuos domésticos y comerciales	Residuos de construcción y demolición	Residuos industriales
<b>Cárcar</b>	Agotar capacidad y posibilidad de ampliación	Agotar capacidad	Agotar capacidad y posibilidad de ampliación
<b>Culebrete</b>	Agotar capacidad y posibilidad de ampliación	Agotar capacidad	Agotar capacidad y posibilidad de ampliación
<b>Góngora</b>	Respetar convenio de cierre 31/12/2022 a pesar de su capacidad remanente Posibilidad de vertedero para residuos domésticos procedentes de la Comarca de Pamplona	Respetar convenio de cierre	Respetar convenio de cierre 31/12/2022 a pesar de su capacidad remanente
<b>Arbizu</b>	-	-	Fecha de cierre 31/12/2017 Nuevo vertedero ya proyectado
<b>Dionisio Ruiz (gestión privada)</b>	-	Posibilidad de uso	Posibilidad de uso

En este contexto se enmarca el presente estudio, ya que a pesar de que el Plan no contempla la construcción de una nueva infraestructura, sí señala la posibilidad de abrir un nuevo vertedero para la FR de la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona, para minimizar la distancia de transporte de residuos hasta los vertederos habilitados,

cuando el vertedero de Góngora proceda a su clausura, y así minimizar los impactos económicos, ambientales y sociales asociados a esta fase de la gestión de los residuos domésticos.



### **3. METODOLOGÍA**

### 3.1. Requisitos para la ubicación de vertederos controlados

Según el desarrollo técnico del Real Decreto 1481/2001 de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, existen una serie de restricciones y limitaciones a la ubicación de vertederos (en este caso de residuos no peligrosos) que se han utilizado para el desarrollo del presente estudio [14]. Aunque no se trata de normativa de obligado cumplimiento, el desarrollo del presente Real Decreto está suficientemente avalado por la práctica y se trata de un documento generalmente aceptado en este ámbito.

El RD 1481/2001 dicta que las instalaciones de vertido serán objeto de una autorización específica, que se emitirá tras el análisis de la ubicación y el establecimiento de su idoneidad en función de criterios técnicos, ambientales y la realización de estudios específicos.

En aplicación del Apartado 1 del Anexo I del RD 1481/2001, la autorización de instalaciones de vertido está condicionada por el cumplimiento de restricciones y limitaciones que determinan la posibilidad de ubicación del mismo:

- **Restricción:** categoría que hace incompatible la ubicación de un vertedero en dicho territorio.
- **Limitación:** categoría por la que la denegación o autorización a la ubicación del vertedero debe establecerse tras comprobar si se superan o no determinados umbrales de protección ambiental.

Las restricciones tendrán una consideración jerárquica superior a las limitaciones y, por tanto, serán objeto de comprobación en primer lugar. Los siguientes apartados reúnen la descripción de los criterios de restricción y limitación considerados.

#### 3.1.1. Restricciones a la ubicación de vertederos

##### 3.1.1.1. Áreas inestables

Zonas donde se hayan identificado evidencias que indiquen la existencia de un peligro significativo asociado a procesos de deslizamiento, caída de bloques, etc., en la zona donde se pretende ubicar el vertedero. Se descartarán aquellas áreas donde la pendiente sea superior al 8%.

##### 3.1.1.2. Áreas volcánicas

El vertedero no se podrá ubicar en el interior de calderas volcánicas, conos volcánicos o cráteres activos o aquellos inactivos catalogados como elemento de interés cultural. Se excluirán además aquellas zonas cuyas evidencias indiquen la existencia de un peligro significativo por procesos de erupción que supongan un daño al vertedero.

Para dicha calificación de riesgo se tendrán en cuenta los procesos activos en los últimos 500 años.

#### 3.1.1.3. *Áreas cársticas y cavidades subterráneas*

No podrá ubicarse el vertedero en dolinas o sobre sistemas cársticos de desarrollo vertical. Tampoco en zonas inestables debido a la presencia de sistemas cársticos de desarrollo horizontal o vertical ni aquellos en los que habiten colonias de quirópteros o que presenten patrimonio catalogado en su interior. Se aplicará una distancia de 100 metros tomada entre el perímetro exterior de la instalación y la zona de los citados procesos.

#### 3.1.1.4. *Zonas con riesgo de aludes*

Se restringirán las zonas que presenten peligro significativo por aludes debido a la acumulación de nieve y aquellos en los que los efectos derivados de los mismos puedan dañar gravemente la instalación.

#### 3.1.1.5. *Aguas superficiales continentales y zonas costeras*

El vertedero no podrá ubicarse en terrenos de Dominio Público Hidráulico ni en riberas, márgenes y zonas de servidumbre y policía de acuerdo con el RDL 1/2001 que aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas [15].

De esta forma, no se podrán ubicar vertederos de residuos no peligrosos y peligrosos en zonas con riesgo de inundación por las aguas para la avenida correspondiente a un período de retorno de 100 años.

#### 3.1.1.6. *Aguas continentales subterráneas y acuíferos*

Será incompatible la ubicación de un vertedero de residuos peligrosos o no peligrosos dentro de las Zonas de Restricción Absoluta, Restricciones Máximas, Zonas Satélites y Restricciones Moderadas de perímetros de protección declarados o en proceso de declaración según el RDL 1/2001 [15].

La distancia vertical necesaria entre la cota mínima del fondo de excavación o apoyo del sistema de impermeabilización y el nivel freático, será superior a 5 metros para vertederos de residuos peligrosos y superior a 2 metros para aquellos de residuos no peligrosos o inertes. En cualquier caso, el nivel freático durante el periodo húmedo no deberá alcanzar la cota mínima del fondo de la excavación.

#### 3.1.1.7. *Zonas húmedas (humedales)*

El vertedero deberá ubicarse fuera de cualquiera de las Zonas Húmedas recogidas en el Inventario de Humedales (en vigor) elaborado por la Dirección General de Obras

Hidráulicas y Calidad de las Aguas o los inventarios aprobados por los Organismos competentes de las Comunidades Autónomas.

La distancia a cumplir respecto al perímetro declarado de protección en vertederos de residuos inertes es de 500 metros, mientras que para los vertederos de residuos no peligrosos es de 1000 metros y para los de residuos peligrosos 2000 metros.

#### *3.1.1.8. Espacios naturales protegidos*

Los vertederos de residuos peligrosos y no peligrosos no podrán ubicarse en terrenos con figura de protección del medio natural declarada y legalmente establecidas con ordenamiento sectorial o específico (LICs, ZEPAs, Zonas de Protección Arqueológica y Paleontológica, etc.) en vigor o en trámite de aprobación de expediente.

#### *3.1.1.9. Vías pecuarias*

No podrán ubicarse vertederos en vías pecuarias reguladas por la Ley 3/95 de Vías Pecuarias [16] y la normativa autonómica que la complete.

#### *3.1.1.10. Zonas residenciales, de equipamientos sanitarios o educativos*

Se respetará una distancia mínima de 500 metros para vertederos de residuos inertes, 1000 metros para vertederos de residuos no peligrosos y 2000 metros para aquellos de residuos peligrosos entre el perímetro del vertedero y núcleos urbanos, núcleos de población, zonas urbanizables y zonas reservadas para equipamientos educativos.

Para elementos del patrimonio arquitectónico y/o cultural, se establecerán 100 metros de distancia mínima a la instalación de vertido, medida con respecto al perímetro declarado de protección de los mismos.

### **3.1.2. Limitaciones a la ubicación de vertederos**

#### *3.1.2.1. Sismicidad*

Se deberán tener en cuenta los criterios de sismicidad de acuerdo con la Norma de Construcción Sismorresistente en vigor [17]. Las instalaciones de vertido se consideran de moderada, normal o especial importancia en función del tipo de vertedero y de la aceleración sísmica básica de la zona.

La limitación para la instalación se basará en un estudio sísmico justificativo en aquellos casos en que las instalaciones se consideren de normal importancia y con aceleración sísmica básica superior a 0,08g y en todos los casos para las instalaciones consideradas de especial importancia.

### 3.1.2.2. *Geotectónica*

Deberá justificarse la ausencia de riesgos de inestabilidad en el caso de determinarse la existencia de fallas neotectónicas con desplazamientos en el Holoceno a menos de 100 metros del perímetro de la instalación.

### 3.1.2.3. *Áreas inestables*

Deberán estudiarse aquellas zonas en las que se evidencie la existencia de procesos de inestabilidad natural o provocada por la acción humana. Será incompatible la ubicación del vertedero, salvo que se disponga de medidas correctoras, en terrenos donde existan materiales que puedan provocar fenómenos de inestabilidad no compatibles con la operación segura del vertedero: áreas con suelos compresibles, materiales con capacidad de hinchamiento, etc. También se considerarán las inestabilidades inducidas por actuaciones antrópicas como presencia de desmontes y rellenos, extracciones de agua subterránea, etc.

### 3.1.2.4. *Áreas inundables*

Los vertederos de residuos inertes no podrán ubicarse en zonas que supongan una modificación significativa de las condiciones de inundabilidad. Para identificar esta circunstancia, cuando se plantee la ubicación de la instalación en terrenos de la franja entre el límite del Dominio Público Hidráulico y el límite de la zona de inundación de periodo de retorno de 100 años, se comprobará que el vertedero no interfiere el flujo de avenida.

### 3.1.2.5. *Espacios naturales protegidos*

Cuando no exista incompatibilidad, será objeto de limitación el patrimonio natural con figura de protección declarada legalmente por la Ley 4/1989 [18]. El análisis de su autorización se realizará caso a caso de conformidad con la legislación de evaluación de impacto ambiental estatal. Los monumentos naturales y paisajes protegidos deberán ser considerados figura de limitación y se analizarán de acuerdo a la legislación de evaluación de impacto ambiental.

### 3.1.2.6. *Embalses*

La localización de la instalación de vertido considerará la existencia de embalses, presas artificiales y canales de riego, teniendo en cuenta si el vertedero se encuentra aguas abajo o aguas arriba del embalse. A este respecto se guardarán las distancias que aparecen en la [Tabla 9](#).

**Tabla 9:** Limitación distancias vertederos a embalses

Elemento	Tipo de vertedero	Distancia	
		Agua arriba	Agua abajo
Embalses para abastecimiento o riego y canales abiertos para abastecimiento o riego	Inerte	500 m	250 m
	No peligroso	1000 m	500 m
	Peligroso	2000 m	1000 m
Embalses dedicados a baño, navegación o ecológico	Inerte	250 m	250 m
	No peligroso	1000 m	250 m
	Peligroso	2000 m	1000 m

### 3.1.2.7. Seguridad aeroportuaria

Cuando exista la posibilidad de emisión o liberación de gases, se aplicará una distancia mínima de alejamiento de 3 km para los aeropuertos comerciales, militares o en los que tenga lugar operación de naves a reacción y de 1,5 km para aeródromos con aeronaves de motor de pistón o aeronaves ligeras.

Si la instalación del vertedero puede ser foco de atracción de aves o de emisión de flujos ascendentes de aire y se encuentra a menos de 10 km de distancia de una pista de una instalación aeroportuaria, será preceptiva su notificación a la autoridad competente a efectos de evaluar la potencial interferencia que puede tener la instalación respecto a la seguridad de las aeronaves.

## 3.2. Delimitación de zonas adecuadas con SIG

Definidos los criterios a tener en cuenta para la ubicación del nuevo vertedero, se analizaron las zonas que cumplen con dichos requisitos ayudados por la herramienta ArcMap de ArcGIS [19]. El conjunto de capas vectoriales *shapefiles* necesarios para realizar el análisis se han obtenido mayoritariamente de la página web IDENA (Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra) [20], en su apartado de descargas.

A continuación, en el apartado 3.2.1 se definen las herramientas y procesos realizados para la delimitación de las zonas adecuadas para la ubicación del vertedero [21]. Posteriormente se describe su aplicación a cada una de las restricciones y limitaciones anteriormente señaladas (ver apartado 3.2.2).

### 3.2.1. Principales herramientas SIG utilizadas

#### 3.2.1.1. ASCII to Raster

Esta herramienta convierte un archivo ASCII, que representa datos ráster, en un dataset ráster. Pertenece a la caja de herramientas *Conversion Tools* de *ArcToolbox*. La forma de proceder es la representada en la Ilustración 12.

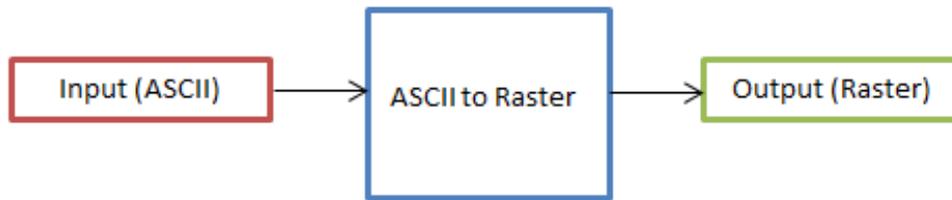


Ilustración 12: Diagrama de flujo herramienta ASCII to Raster

### 3.2.1.2. Slope

Para cada celda de un ráster, la herramienta calcula la tasa máxima de cambio del valor de dicha celda con respecto a sus vecinas, generando como salida otro ráster clasificado por pendientes (ver [Ilustración 13](#)). Básicamente, el cambio máximo en la elevación sobre la distancia entre la celda y sus ocho vecinas identifica el descenso cuesta abajo más empinado desde la celda. Estas pendientes se pueden expresar en grados o porcentaje (elevación en porcentaje). Pertenece a la caja de herramientas *Spatial Analyst*.

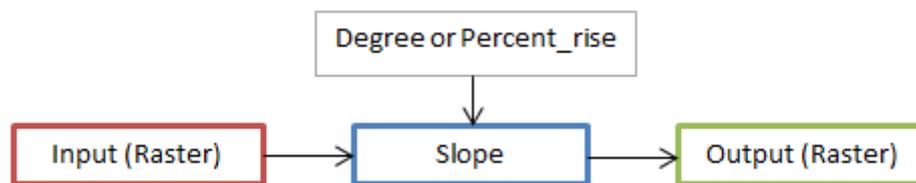


Ilustración 13: Diagrama de flujo herramienta Slope

### 3.2.1.3. Buffer

Creación de polígonos de zona de influencia alrededor de entidades de entrada (input features) a una distancia especificada. La rutina de zona de influencia recorre cada uno de los vértices de la entidad de entrada y crea desplazamientos de la zona de influencia (ver [Ilustración 14](#)). Las entidades del área de influencia de salida (output feature class) se crean a partir de estos desplazamientos. Pertenece a la caja de herramientas *Analysis Tools*.

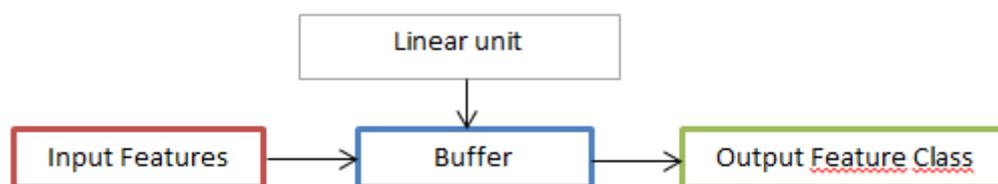


Ilustración 14: Diagrama de flujo herramienta Buffer

### 3.2.1.4. Clip

Extrae entidades de entrada (input features) que se superponen a las entidades del clip (clip features). Esta herramienta se usa para recortar una parte de una clase de

entidad utilizando una o más entidades de otra clase de entidad como molde. Esto es útil para crear una nueva clase de entidad, conocida también como área de estudio o área de interés (AOI), que contenga un subconjunto geográfico de las entidades de otra clase de entidad mayor (ver [Ilustración 15](#)). Pertenece a la caja de herramientas *Analysis Tools*.



Ilustración 15: Diagrama de flujo herramienta Clip

#### 3.2.1.5. Merge

Combina datasets de entrada múltiples del mismo tipo de datos en un nuevo dataset de salida único (ver [Ilustración 16](#)). Esta herramienta puede combinar tablas o clases de entidad de punto, de línea o de polígono. Pertenece al grupo de herramientas *Data Management Tools*.



Ilustración 16: Diagrama de flujo herramienta Merge

#### 3.2.1.6. Dissolve

Agrega entidades (input features) basadas en atributos especificados simplificando los datos basados en un atributo de la cobertura y fusionando los polígonos cuyos valores son iguales en el campo de la tabla de atributos que haya sido seleccionado para ejecutar el proceso (ver [Ilustración 17](#)). Pertenece al grupo de herramientas *Data Management Tools*.

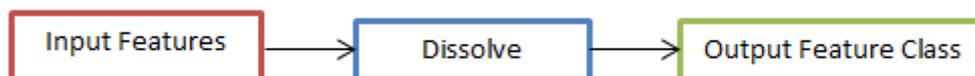


Ilustración 17: Diagrama de flujo herramienta Dissolve

#### 3.2.1.7. Select by attributes

Proporciona una expresión de consulta SQL (acrónimo en inglés de *Structure Query Language*) que se utiliza para seleccionar entidades que coincidan con los criterios de selección. Las entidades de una capa, se seleccionan mediante una consulta de

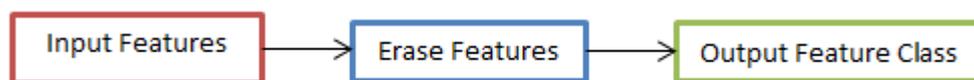
atributos. Esta herramienta no pertenece al conjunto de herramientas de *ArcToolbox* sino que aparece al abrir la tabla de atributos de cada *shapefile*.

#### 3.2.1.8. *Add X, Y Data*

Además de las fuentes de datos, como los *shapefiles*, se pueden agregar datos tabulares al mapa que contienen ubicaciones geográficas en forma de coordenadas x e y. Si la tabla tiene también valores de elevación se pueden agregar datos como contenido 3D a la escena.

#### 3.2.1.9. *Erase*

Creará una clase de entidad mediante la superposición de entidades de entrada con los polígonos de las entidades de borrado (ver [Ilustración 18](#)). Solo las partes de las entidades de entrada que no queden comprendidas en los límites externos de las entidades de borrado se copiarán a la clase de entidad de salida. Pertenece al grupo de herramientas *Analysis Tools*.



**Ilustración 18:** Diagrama de flujo herramienta Erase

#### 3.2.1.10. *Multipart to singlepart*

Creará una clase de entidad que contiene entidades de parte simple generadas al separar entidades multiparte de entrada. Cada parte de una entidad multiparte de entrada se convierte en una entidad de parte simple individual en la clase de entidad de salida. Las entidades que ya son de parte simple no se ven afectadas (ver [Ilustración 19](#)). Pertenece al grupo de herramientas *Data Management Tools*.



**Ilustración 19:** Diagrama de flujo herramienta Multipart to singlepart

#### 3.2.1.11. *Extract values to point*

Extrae los valores de celda basados en un conjunto de entidades de punto (input point features) y registra los valores en la tabla de atributos de una clase de entidad de salida (ver [Ilustración 20](#)). Pertenece al grupo de herramientas *Spatial Analyst Tools*.

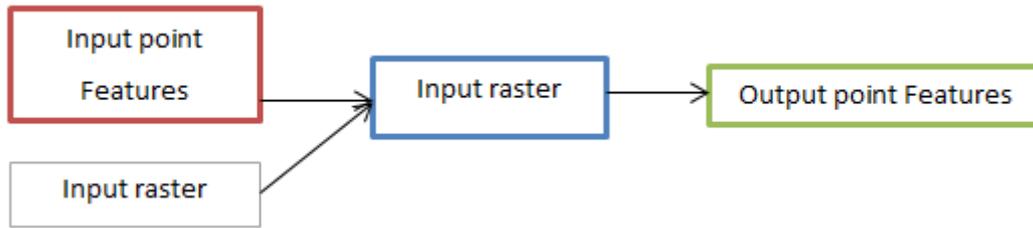


Ilustración 20: Diagrama de flujo herramienta Extract values to point

#### 3.2.1.12. Raster to polygon

Convierte un dataset ráster en entidades de polígono. El ráster de entrada puede tener cualquier tamaño de celda y debe ser un dataset ráster entero válido (ver [Ilustración 21](#)). Pertenecce al grupo de herramientas *Conversion Tools*. El parámetro campo (field) permite elegir qué campo de atributo del dataset ráster de entrada se convierte en un atributo en la clase de entidad de salida.

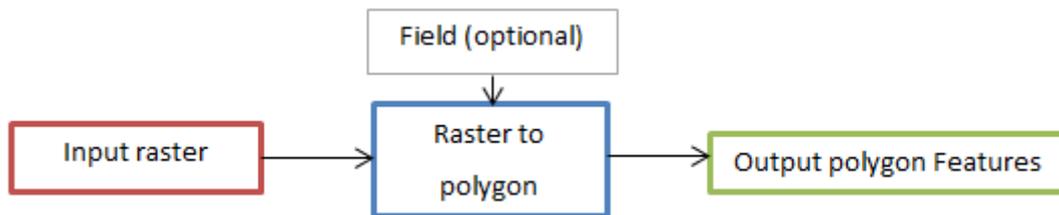


Ilustración 21: Diagrama de flujo herramienta Raster to polygon

#### 3.2.1.13. Reclassify

Reclasifica o cambia los valores en un ráster. El ráster de entrada debe tener estadísticas válidas (ver [Ilustración 22](#)). Pertenecce al grupo de herramientas *3D Analyst Tools*.

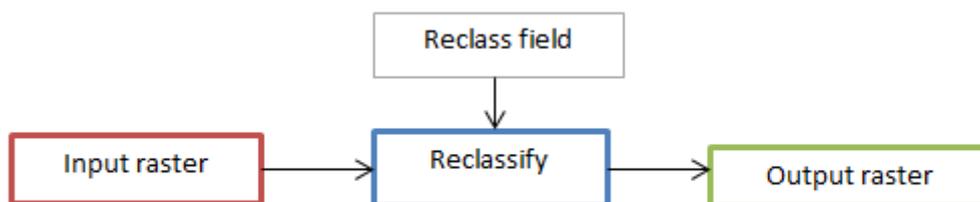


Ilustración 22: Diagrama de flujo herramienta Reclassify

#### 3.2.1.14. Interpolación espacial

Los métodos deterministas de interpolación espacial generan predicciones en base a los puntos medidos y de acuerdo a formulaciones matemáticas específicas, cuyas características intrínsecas definen la suavidad de la superficie resultante. Se han

utilizado sólo métodos deterministas y no geoestadísticos, ya que para el uso de estos últimos se deben cumplir una serie de supuestos (normalidad y estacionariedad) que los datos de las muestras usadas no cumplían. Por tanto, se han utilizado los siguientes métodos deterministas [21]:

IDW: interpola una superficie de ráster a partir de puntos utilizando una técnica de distancia inversa ponderada. La interpolación mediante distancia inversa ponderada determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. Este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra.

Radial Basis Functions: las funciones de base radial (RBF) son una serie de técnicas de interpolación exacta, es decir, la superficie debe pasar por cada valor de muestra medido. Los métodos RBF, como interpoladores exactos, son distintos de los interpoladores polinómicos globales y locales, que son interpoladores inexactos que no requieren que la superficie pase por los puntos medidos.

Local Polynomial Interpolation: la interpolación global polinómica emplea un ajuste por mínimos cuadrados a los datos para la determinación de superficies estimadas. Dicho ajuste se realiza utilizando únicamente los puntos que se encuentran dentro de una vecindad definida por el usuario.

### **3.2.2. Aplicación de las herramientas SIG a las restricciones y limitaciones**

#### **3.2.2.1. Áreas inestables**

Para la delimitación de las áreas inestables, se utiliza la hoja correspondiente a la Comunidad Foral de Navarra del Modelo Digital del Terreno (MDT) del servicio de descargas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) [22]. Dado que el formato ASCII no es un formato ráster lo primero que se hace es convertirlo con la herramienta *ASCII to Raster*. Una vez realizada la conversión, se obtiene la pendiente de los distintos píxeles que componen el MDT mediante la herramienta *Slope*. Finalmente se seleccionan las pendientes superiores al 8%.

#### **3.2.2.2. Áreas volcánicas**

No se consideran áreas volcánicas en la Comunidad Foral de Navarra, por lo que no se ha generado capa de restricción asociada.

#### **3.2.2.3. Áreas cársticas y cavidades subterráneas**

Se utiliza la capa de cuevas naturales de Navarra, de la página del IDENA [20] y el mapa de Karst de España a escala 1/1.000.000 obtenido de la página web del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) [23].

A la capa de cuevas, se le aplica la herramienta *Buffer* a una distancia de 100 metros del punto de ubicación de cada cueva. El mapa de Karts de España se abre en ArcMap con extensión .lyr. Este tipo de extensión, no permite su conversión a .shp, formato habitual con el que trabaja ArcMap para la edición de capas vectoriales. Para solucionar esta problemática se ha generado una capa poligonal para delinear manualmente las zonas kársticas del mapa base mediante el *Editor* de ArcMap.

Generadas las capas de buffer de cuevas y polígonos de zonas kársticas, se unen las capas anteriores en una única capa resultado usando la herramienta *Merge*. Tras aplicar *Merge* con la herramienta *Dissolve*, se eliminan las líneas divisorias de las capas que se han unido. Estas dos herramientas se utilizan para unir todas las capas resultantes de las restricciones y limitaciones y así obtener la capa de salida de todas las zonas que no cumplen los criterios de ubicación ya señalados (ver apartado 3.1).

#### 3.2.2.4. Aguas superficiales continentales y zonas costeras

Para tener en cuenta esta restricción, se hace uso de las capas ríos y superficies de agua existentes en la página de descargas del IDENA [20]. A las superficies de agua se les aplica la herramienta *Buffer*, con una zona de influencia para cursos de agua de 100 metros (zona de policía) en ambos márgenes del curso de agua según el RDL 1/2001 [15]. En cuanto a las superficies de agua, se tiene en cuenta la tabla de embalses (ver Tabla 9) y se realizan los respectivos *Buffers*.

Para la restricción de ubicar un vertedero de RNP en zonas con riesgo de inundación en un periodo de retorno de 100 años, se utiliza la capa de periodo de retorno de la página web de IDENA. En esta capa aparecen señaladas las superficies afectadas por las inundaciones en función de sus periodos de retorno. Así se crea una capa mediante *Select by attributes* en la que aparecen aquellas superficies inundadas para periodo de retorno de hasta 100 años.

#### 3.2.2.5. Aguas continentales subterráneas y acuíferos

Se carga en ArcMap la capa de vulnerabilidad de los acuíferos. Este *shapefile* contiene las áreas de la Comunidad Foral de Navarra agrupadas en función de si la vulnerabilidad de los acuíferos de la zona es alta, media, baja o nula. No se permitirá la ubicación del futuro vertedero en zona de vulnerabilidad alta y se preferirá zona de vulnerabilidad baja o nula sobre vulnerabilidad media.

La cota del nivel freático, deberá ser mayor de 2 metros por debajo de la cota mínima del fondo de la excavación (ver subapartado 3.1.1.6). Para caracterizar el nivel freático de la zona, se utiliza la malla de puntos de valores de nivel freático generada por Fan *et al* [24]. Esta tabla se introduce en el programa mediante la opción *Add X, Y Data*. Una vez que los puntos asociados a dicha tabla se transforman en *shapefile*, el paso siguiente es realizar la interpolación de los puntos con las herramientas anteriormente definidas (IDW, RBF y LPI).

Una vez realizada la interpolación, la superficie continua con valores de profundidad de nivel freático resultante se convierte en polígono. Para ello, en primer lugar se reclasifica el ráster en dos categorías en función de la cota del nivel freático mediante la herramienta *Reclassify*: la primera será hasta 14 metros bajo la cota de superficie y la segunda por debajo de la misma. Una vez realizada la clasificación, se convierte en polígono mediante la herramienta *Raster to polygon*. Finalizada la conversión, la zona con cota del nivel freático menor de 14 metros se une a la malla de zonas no adecuadas para la ubicación del vertedero.

#### 3.2.2.6. Zonas húmedas (húmedales)

Con la capa de zonas húmedas obtenida del IDENA, se realiza un *Buffer* de 1000 metros según recomienda la normativa para vertedero de RNP [14].

#### 3.2.2.7. Espacios naturales protegidos

Utilizando la capa Red Natura 2000 del IDENA, se obtienen las zonas de LICs, ZEPAs y demás figuras de protección donde no podrá ubicarse el nuevo vertedero. No hay que realizar ninguna edición sobre la capa con lo que se une al grupo de capas ya editadas de áreas no adecuadas.

#### 3.2.2.8. Vías pecuarias

Se realiza el mismo procedimiento que con los espacios naturales protegidos (ver subapartado 3.2.2.7). La capa utilizada en este caso es la de vías pecuarias del IDENA.

#### 3.2.2.9. Zonas residenciales, de equipamientos sanitarios o educativos

Para modelar esta restricción, se carga en ArcMap la capa de núcleos de población (adquirida del IDENA) y se aplica la herramienta *Buffer* con una zona de influencia de 1000 metros por tratarse de un vertedero de RNP. En cuanto a elementos del patrimonio cultural, destaca la presencia del Camino de Santiago. A esta capa se le aplica un *Buffer* de 100 metros.

#### 3.2.2.10. Seguridad aeroportuaria

El único aeropuerto existente en la zona es el situado a 6 km de la ciudad de Pamplona dentro de los municipios de Noáin y Esquíroz. IDENA es también la fuente para encontrar la capa tipo punto relativa a dicho aeropuerto. Se aplica un *Buffer* de 3000 metros como la distancia mínima de alejamiento para aeropuertos comerciales.

Realizada la unión de todas las capas resultado de las restricciones y limitaciones como se define anteriormente, el paso siguiente es extraer las zonas que sí cumplen todas las condiciones. Para ello se carga en ArcMap la capa de los límites de la Comunidad Foral de Navarra, también disponible en el IDENA.

Cargada la capa se usa la herramienta *Erase* para extraer las zonas adecuadas del área total de estudio. Como input se coloca la capa de los límites y como *Erase* la capa poligonal de zonas no permitidas. Como resultado se obtienen las zonas permitidas en forma de nuevo *shapefile* tipo polígono. Para dividir el polígono y obtener el área de cada una de estas zonas, se utiliza la herramienta *Multipart to singlepart*.

### 3.3. Priorización de zonas

Obtenidas las zonas adecuadas para la ubicación del vertedero, se seleccionan 10 zonas o polígonos con suficiente superficie para la ubicación del mismo y en diferentes localizaciones de la Comunidad Foral de Navarra, a fin de llevar a cabo el análisis multicriterio que se expone a continuación. Se ha considerado como superficie mínima necesaria para el vertedero 40 hectáreas [9].

#### 3.3.1. Criterios para la toma de decisiones

La ubicación de una instalación de eliminación de residuos provoca impactos (de carácter económico, ambiental y social) más o menos importantes dependiendo del lugar donde ésta se ubique. Por ello es fundamental que se definan aquellos criterios más importantes para realizar el análisis. Los criterios económicos, ambientales y sociales considerados en este caso se agrupan en la [Tabla 10](#).

**Tabla 10:** Criterios y subcriterios tenidos en cuenta en el análisis

Tipo de criterio	Subcriterios
<b>Económico</b>	SC 1.1) Expropiaciones SC 1.2) Material de cobertura SC 1.3) Costes de transporte de los residuos SC 1.4) Costes de funcionamiento de la instalación (temperatura)
<b>Ambiental</b>	SC 2.1) Emisiones SC 2.2) Vulnerabilidad de los acuíferos SC 2.3) Proximidad a Red Natura SC 2.4) Generación de lixiviados (precipitaciones)
<b>Social</b>	SC 3.1) Cercanía a núcleos de población SC 3.2) Cuencas visuales SC 3.3) Vientos

##### 3.3.1.1. Criterio económico

Los costes económicos de crear centros de eliminación de residuos en un punto son, evidentemente, complicados de estimar, pero únicamente serán de interés aquellos que puedan tener variaciones de carácter espacial, dada la naturaleza del presente trabajo. Por ello, los aspectos económicos se han dividido en los siguientes subcriterios:

### SC 1.1) Expropiaciones

Se trata de costes relacionados con la adquisición de los terrenos para la construcción del vertedero. Los valores de los distintos tipos de cultivos se han determinado tomando como base los costes de expropiación proporcionados por el MAGRAMA [25] en su informe de Precios medios anuales de las tierras de uso agrario [26] y de los valores del estudio “Localización de centros de tratamiento de residuos: una propuesta metodológica basada en un SIG” [9], resultando en los valores de la [Tabla 11](#).

**Tabla 11:** Valor de los cultivos

<b>Categoría</b>	<b>Valor</b>
<b>Cultivos herbáceos regadío</b>	0,02
<b>Cultivos leñosos regadío</b>	0,04
<b>Frondosas</b>	0,05
<b>Coníferas/Frondosas</b>	0,07
<b>Coníferas</b>	0,10
<b>Cultivos herbáceos seco</b>	0,11
<b>Cultivos leñosos seco</b>	0,16
<b>Forestal no arbolado</b>	0,20
<b>Improductivo</b>	0,25

La obtención de los valores a utilizar en el análisis multicriterio se llevará a cabo mediante el sumatorio de los valores de la [Tabla 11](#) multiplicado por su respectiva superficie para cada una de las propuestas.

### SC 1.2) Material de cobertura

La elección del material de cobertura es uno de los puntos clave en la ejecución del vertedero, con repercusión en la selección de terrenos, pues éstos deben contar con fuentes de aprovisionamiento cercanas y explotables. Al material de cobertura se le exigen una serie de requisitos como impermeabilidad, estabilidad, compactibilidad adecuada, etc. Para poder agrupar las litologías (ver [Tabla 12](#)) presentes en cada zona en función de su grado de adecuación como cobertura, se han utilizado las memorias de cartografía geológica de Navarra a escala 1/25.000 de aquellas hojas asociadas a las zonas de posible ubicación del vertedero [27].

**Tabla 12:** Valor del material de cobertura

<b>Categoría</b>	<b>Valor</b>
<b>Arcillas</b>	1
<b>Arcillas mezcladas</b>	0,75
<b>Margas y areniscas</b>	0,25
<b>Cantos, gravas y arenas</b>	0
<b>Terrazas</b>	0
<b>Yesos</b>	0
<b>Improductivo</b>	0

El sumatorio de los valores multiplicado por su superficie se utilizará en el análisis multicriterio.

### SC 1.3) Coste de transporte de los residuos

Se trata de uno de los costes más importantes en la gestión de los residuos, por lo que se procurará minimizar dicho coste. El coste de transporte desde las plantas de tratamiento hasta la instalación de eliminación es de 0,21 €/ton\*km [28].

### SC 1.4) Coste de funcionamiento de la instalación

Se considera que cuanto menor sea la temperatura, mayor será el coste para el correcto funcionamiento de la instalación. Esto es debido a que a medida que las temperaturas son más bajas, resulta más difícil realizar adecuadamente las tareas de vertido y cobertura de los residuos. Se produce sobre todo si la superficie del vertedero se encuentra helada debido a las bajas temperaturas.

#### 3.3.1.2. *Criterio ambiental*

El criterio ambiental requiere un planteamiento diferente al seguido para el criterio económico. En este caso, se trata de intentar minimizar las molestias y riesgos que la presencia de dichas instalaciones generan en el medio ambiente, es decir, medir la mayor o menor vulnerabilidad del territorio a los efectos de la eliminación de los residuos. Para ello se han considerado los siguientes subcriterios:

### SC 2.1) Emisiones

Durante el transporte de los residuos, se producen emisiones atmosféricas que deberán considerarse por su afección al medio ambiente. Las emisiones de transporte desde las plantas de tratamiento hasta la instalación de eliminación se estiman en 0,08 kg CO<sub>2</sub> eq/ton\*km [29].

### SC 2.2) Vulnerabilidad de los acuíferos

Es preferible localizar el vertedero en zonas de baja vulnerabilidad de los acuíferos que en zonas de vulnerabilidad media en las que existe mayor riesgo hidrológico ante una eventual descarga de lixiviados a la red fluvial. En la [Tabla 13](#) se muestra la escala de valores otorgada, según una progresión lineal, a los distintos niveles de vulnerabilidad de la zona.

**Tabla 13:** Valor según la vulnerabilidad de los acuíferos

Vulnerabilidad	Valor
Nula	1
Baja	0,66
Media	0,33
Alta	0

La obtención de los valores a utilizar en el análisis multicriterio se llevará a cabo mediante el sumatorio de los valores de la [Tabla 13](#) multiplicado por su respectiva superficie para cada una de las propuestas.

#### SC 2.3) Proximidad a la Red Natura

Se preferirá la ubicación del vertedero lo más alejada posible de zonas o espacios protegidos.

#### SC 2.4.) Generación de lixiviados

La pluviometría incide en aspectos fundamentales como la generación de lixiviados, que constituyen el riesgo principal de contaminación de acuíferos en el vertedero. En condiciones de operación y meteorología similares, la producción de lixiviados depende directamente de la pluviometría media de la zona.

##### *3.3.1.3. Criterio social*

El presente criterio está ligado a las molestias y riesgos que una instalación de eliminación puede producir a la población que reside en el entorno cercano. En consecuencia se consideran los siguientes subcriterios sociales:

#### SC 3.1) Cercanía a núcleos de población

Se valora en función de la población que reside cercana a la ubicación del vertedero, en un entorno de 5 km, de forma que tiene en cuenta el rechazo social que una instalación del tipo suele provocar en la población circundante.

#### SC 3.2) Cuencas visuales

El segundo subcriterio social trata de valorar el impacto visual que las instalaciones de vertido generan sobre la población afectada. Se valora en función de la superficie que queda visible desde la ubicación del vertedero.

#### SC 3.3) Vientos

El régimen de vientos condiciona la transmisión de las emisiones y gases generados en el vertedero a las poblaciones cercanas, principalmente en forma de olores desagradables. En función de la cercanía del núcleo de población al vertedero, se otorga un valor a dicho subcriterio, tal y como se recoge en la [Tabla 14](#).

**Tabla 14:** Valor del subcriterio vientos en función de la distancia al vertedero

Distancia del núcleo de población al vertedero (km)	Valor
1	0
De 1 a 2	$Y=0,5x-0,5$
2	0,5
De 2 a 5	$Y=1/6x+1/6$
5	1

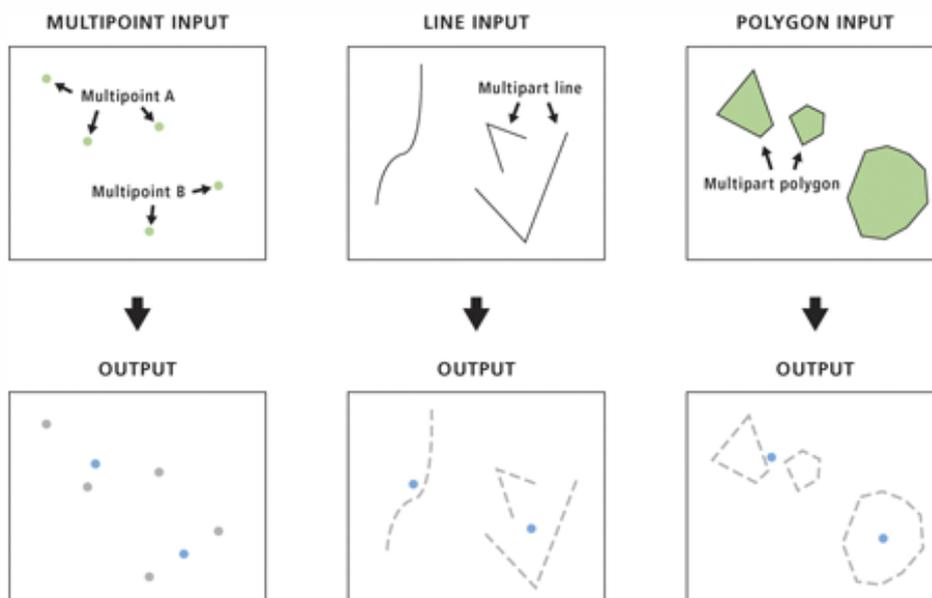
La obtención de los valores a utilizar en el análisis multicriterio se llevará a cabo mediante el sumatorio de las poblaciones afectadas (habitantes) por los valores de la [Tabla 14](#) en función de sus distancias.

### 3.3.2. Principales herramientas SIG utilizadas

Como anteriormente para la delimitación de las zonas adecuadas, también se han utilizado determinadas herramientas SIG para la priorización de zonas que han facilitado la obtención de resultados [21]. Algunas de estas herramientas ya han sido descritas en el subapartado 3.2.1 y, por tanto, solo se definen a continuación aquellas que no han sido usadas anteriormente.

#### 3.3.2.1. Feature to point

Creará una clase de entidad que contiene puntos generados a partir de las ubicaciones representativas de las entidades de entrada (ver [Ilustración 23](#)). Dicho de otra forma, crea centroides de entidades de entrada de diferentes tipos (polígonos, líneas, puntos). Pertenece al grupo de herramientas *Data Management Tools*.



**Ilustración 23:** Diagrama de flujo herramienta Feature to point

### 3.3.2.2. Near

Calcula la distancia y la información de proximidad adicional entre entidades de entrada y la entidad más cercana en otra clase de entidad o capa (ver [Ilustración 24](#)). Pertenece al grupo de herramientas *Analysis Tools*.



Ilustración 24: Diagrama de flujo herramienta Near

### 3.3.2.3. Point distance

Determina la distancia desde una entidad de entrada tipo punto a todos los puntos de otra entidad cercana dentro de un radio de búsqueda especificado (ver [Ilustración 25](#)). Pertenece al grupo de herramientas *Analysis Tools*.

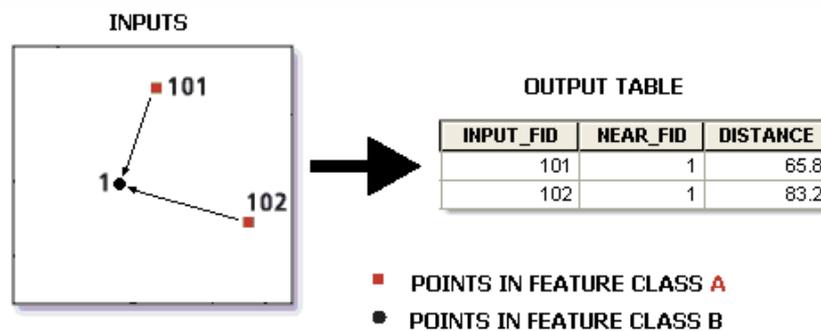


Ilustración 25: Diagrama de flujo herramienta Point distance

### 3.3.2.4. Multiple ring buffer

Crea varias zonas de influencia a distancias especificadas alrededor de las entidades de entrada (ver [Ilustración 26](#)). Estas áreas de influencia pueden combinarse y disolverse opcionalmente utilizando los valores de distancia de área de influencia para crear áreas de influencia no superpuestas. Pertenece al grupo de herramientas *Analysis Tools*.

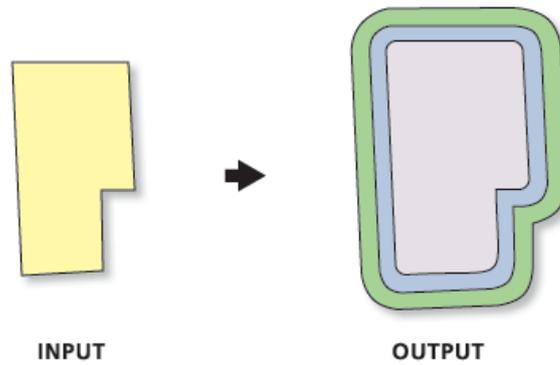


Ilustración 26: Diagrama de flujo herramienta Multiple ring buffer

### 3.3.2.5. Feature to polygon

Creación de una clase de entidad que contiene polígonos generados a partir de áreas encerradas por entidades de polígono o de línea de entrada (ver [Ilustración 27](#)). Pertenece al grupo de herramientas *Data Management Tools*.

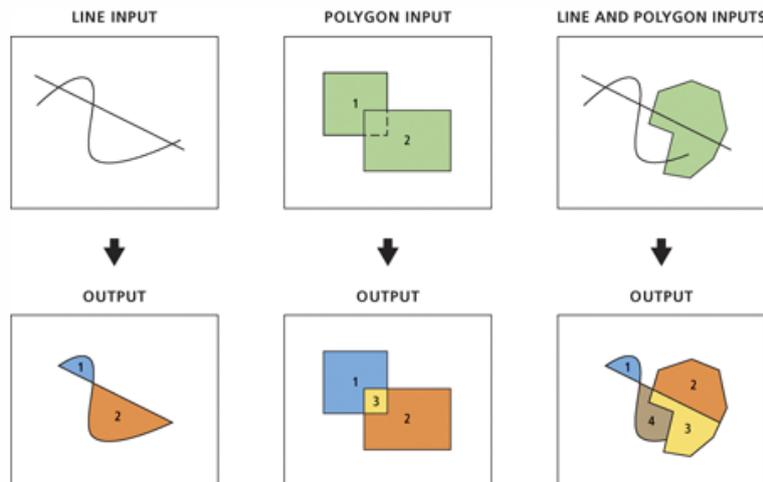


Ilustración 27: Diagrama de flujo herramienta Feature to polygon

### 3.3.2.6. Extract by mask

Extrae las celdas de un ráster que corresponden a las áreas definidas por una máscara (ver [Ilustración 28](#)). Pertenece al grupo de herramientas *Spatial Analyst Tools*.

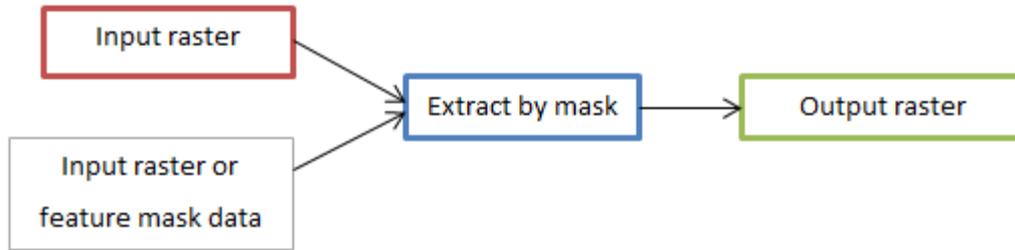


Ilustración 28: Diagrama de flujo herramienta Extract by mask

### 3.3.2.7. Observer points

Identifica qué puntos de observador son visibles desde cada ubicación de superficie de ráster (ver Ilustración 29). Pertenece al grupo de herramientas *Spatial Analyst Tools*.

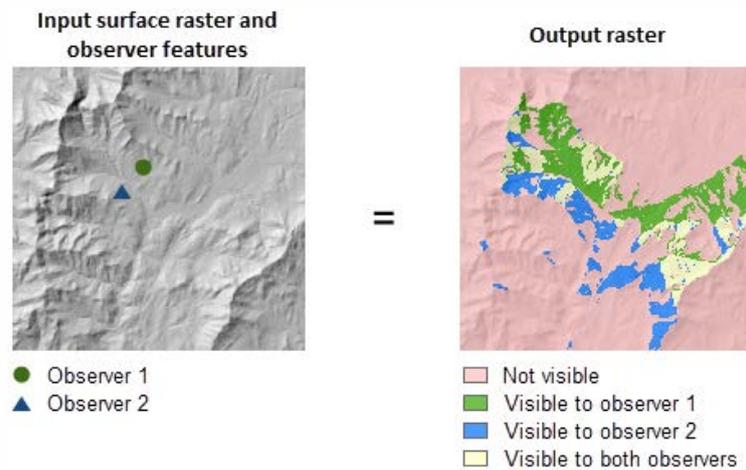


Ilustración 29: Diagrama de flujo herramienta Observer points

### 3.3.2.8. Field calculator

Permite realizar cálculos simples y avanzados en todos los registros o solo en los seleccionados. Además, puede calcular áreas, perímetros y otras propiedades geométricas en campos de tablas de atributos.

### 3.3.2.9. New Network Dataset

Se utiliza normalmente en la modelización de redes de transporte o abastecimiento. Permite generar dicha red a partir de una entidad de entrada. El proceso de generación del mismo, permite modelizar giros, tipo de conectividad entre ejes, modelar las diferentes cotas de los ejes de la red, etc.

### 3.3.2.10. Find closest facilities

Mide el coste de viajar entre incidentes e instalaciones y determina cuáles están más cercanas entre sí. Se puede especificar el número de instalaciones a buscar y si la

dirección del viaje es acercándose o alejándose de ellas. El solucionador de instalación más cercana muestra las mejores rutas entre incidentes e instalaciones, informa sobre sus costes de viaje y devuelve instrucciones para conducir. Al buscar la instalación más cercana, se pueden especificar restricciones, como un coste de valor límite más allá del cual *Network Analyst* no buscará instalaciones. *Network Analyst* permite llevar a cabo varios análisis de instalaciones más cercanas simultáneamente. Esto significa que puede tener varios incidentes y buscar la instalación o instalaciones más cercanas para cada incidente.

### **3.3.3. Aplicación de las herramientas SIG en los criterios**

#### **3.3.3.1. SC 1.1) Expropiaciones**

Para calcular la superficie afectada de cada tipo cultivo se utiliza el mapa de cultivos y aprovechamientos en formato *shapefile* disponible en la página web del IDENA [20]. Una vez añadido a ArcMap se realiza un *Clip* en las zonas de posible ubicación del vertedero para obtener la cobertura de cultivos de cada una de ellas.

#### **3.3.3.2. SC 1.2) Material de cobertura**

El proceso es similar que para el subcriterio de expropiaciones pero para diferenciar los materiales presentes en la zona se hace uso de los mapas geológicos (unidades litológicas) a escala 1/25.000 de la web del IDENA.

#### **3.3.3.3. SC 1.3) Coste de transporte de los residuos**

El cálculo de la distancia desde las zonas de posible ubicación del vertedero hasta las plantas de tratamiento actuales se lleva a cabo utilizando la capa de ejes de la red de carreteras en formato *shapefile* disponible en la página de descargas del IDENA [20]. Para poder realizar cálculos de distancias con ArcMap primero hay que convertir la capa en un *Network Dataset* con la herramienta *New Network Dataset*. Una vez creado, con la herramienta *Find Closest Facilities* se calculan las distancias mínimas por carretera desde las zonas hasta las plantas de tratamiento, para posteriormente calcular los costes de transporte.

#### **3.3.3.4. SC 1.4) Coste de funcionamiento de la instalación**

El coste de funcionamiento de la instalación está relacionado con la temperatura y el clima en que el vertedero se ubica. Las temperaturas de la zona (en especial las más bajas que son las que provocarán problemas de funcionamiento) se caracterizan empleando la información de las temperaturas medias de invierno de las estaciones meteorológicas presentes en Navarra a través del portal del Sistema de Información Geográfica de datos Agrarios (SIGA) [30]. Dicha información se carga en ArcMap como una capa de puntos y, posteriormente, se realiza una interpolación entre las temperaturas medias de invierno. Tras la interpolación, se obtienen las temperaturas

medias de invierno en las zonas propuestas mediante la herramienta *Extract Values to Point*.

#### 3.3.3.5. SC 2.1) Emisiones

El cálculo de las emisiones se realiza a partir del *Network Dataset* anteriormente creado. Con las distancias obtenidas desde las plantas de tratamiento hasta los vertederos, se realiza el cálculo de las emisiones.

#### 3.3.3.6. SC 2.2) Vulnerabilidad de los acuíferos

Para este subcriterio se dispone de la capa de vulnerabilidad de acuíferos del IDENA. Se realiza con ella un *Clip* en la zona de los vertederos consiguiendo la información del tipo de vulnerabilidad en cada una de las posibles zonas de ubicación.

#### 3.3.3.7. SC 2.3) Proximidad a la Red Natura

Para clasificar las zonas en función de su cercanía a espacios protegidos, se emplea la herramienta *Near* obteniendo como resultado un nuevo campo en una tabla con los puntos más cercanos de la Red Natura a cada una de las propuestas.

#### 3.3.3.8. SC 2.4.) Generación de lixiviados

La cantidad de lixiviados generados se determina a partir de las precipitaciones medias de las estaciones meteorológicas de Navarra descargadas del SIGA, como ya se realizó con las temperaturas. El proceso es similar al definido anteriormente para las temperaturas: se interpola la superficie y se extraen los valores de precipitaciones en los vertederos.

#### 3.3.3.9. SC 3.1) Cercanía a núcleos de población

Para el modelado de este subcriterio se carga en ArcMap la capa de núcleos de población de Navarra disponible en la web del IDENA y se realiza un *Buffer* de 5 km desde el centroide del mismo para ver la población afectada por el vertedero.

#### 3.3.3.10. SC 3.2) Cuencas visuales

Mediante la herramienta *Observer points*, se conocen el número de puntos del territorio desde los cuales son visibles las zonas de ubicación del vertedero. Con el MDT del territorio de Navarra y con los centroides de los vertederos como puntos, se obtiene como resultado una tabla en la que se indican los puntos visibles desde cada una de las zonas de posible ubicación.

### 3.3.3.11. SC 3.3) Vientos

Para el análisis de los vientos y la influencia sobre la población, se ha utilizado la información de vientos de las estaciones meteorológicas con rosa de vientos más cercanas a las zonas de estudio [31]. De cada una de ellas se extraen las direcciones de viento predominantes y con ellas se realiza una capa poligonal hasta una distancia de 5 km desde el vertedero, ya que puede considerarse como el límite a partir del cual los olores se disipan lo suficiente como para no producir molestias en la población [32]. Dentro de esta capa se establece la población afectada mediante la herramienta *Clip*.

### 3.3.4. Análisis multicriterio

El análisis multicriterio es una herramienta adecuada para ayudar en la toma de decisiones de la eliminación de los residuos municipales, ya que, a partir de la combinación de varios criterios de distinta naturaleza, se puede obtener una solución adecuada de acuerdo a factores económicos, ambientales y sociales. Con el fin de obtener un resultado que combine estos tres pilares y poder valorar las propuestas planteadas, se ha empleado una metodología que combina los métodos AHP (Analytic Hierarchy Process) y TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) para facilitar el proceso de toma de decisiones.

#### 3.3.4.1. Importancia relativa de los criterios

Definidos los criterios y subcriterios a considerar (ver [Tabla 10](#)), la ponderación de los mismos es una cuestión primordial en los resultados del análisis multicriterio. En este caso se plantean cuatro posibles escenarios para analizar la sensibilidad de los resultados así como la adecuación de cada alternativa según los criterios considerados.

- a) Escenario equilibrado: los tres criterios descritos tienen el mismo peso. Es decir, los valores obtenidos al unir los subcriterios en los tres bloques tienen un peso total del 33%.
- b) Preponderancia económica: tiene mayor peso el criterio económico respecto a los otros dos, esto es, un 60% para el económico y 20% para los criterios ambiental y social.
- c) Preponderancia ambiental: tiene mayor peso el criterio ambiental (60%) respecto al económico y al social (20% cada uno).
- d) Preponderancia social: tiene mayor peso el criterio social (60%) respecto al económico y al ambiental (20%).

En cuanto a la ponderación interna dentro de cada criterio, el económico se ha dividido en cuatro subcriterios diferenciando por un lado el coste de transporte de residuos (S.C. 1.3) con un peso del 62,5% y un 12,5% para el resto de subcriterios: expropiaciones (S.C. 1.1), material de cobertura (S.C. 1.2) y coste de funcionamiento de la instalación (S.C. 1.4). Por su parte, el criterio ambiental se ha dividido en dos grupos de subcriterios según el peso de los mismos, diferenciándose por una parte las

emisiones (S.C. 2.1) y la generación de lixiviados (S.C. 2.4) con un peso del 37,5% cada uno y, por otra parte, la vulnerabilidad de los acuíferos (S.C. 2.2) y proximidad a la Red Natura (S.C. 2.3) con pesos del 12,5%. En el caso del criterio social, los pesos para cada subcriterio son iguales con un 33,3% para cercanía a núcleos de población (S.C. 3.1), cuencas visuales (S.C. 3.2) y vientos (S.C. 3.3). La obtención de los pesos de estos subcriterios se ha determinado empleando el método AHP (Analytic Hierarchy Process) descrito a continuación.

### 3.3.4.2. Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

El método AHP, creado por Saaty [33], tiene por objeto determinar la importancia relativa del conjunto de criterios, analizados por pares entre sus elementos constitutivos de acuerdo a una escala de valores que aparece en la [Tabla 15](#). Para el caso del presente estudio se ha simplificado la escala original de Saaty según se muestra en la [Tabla 16](#).

Tabla 15: Escala de comparación de Saaty

Término lingüístico (i respecto a j)	Valor numérico	
	$a_{ij}$	$a_{ji}$
<b>Absolutamente menos importante</b>	1/9	9
<b>Mucho menos importante</b>	1/7	7
<b>Menos importante</b>	1/5	5
<b>Ligeramente menos importante</b>	1/3	3
<b>Igualmente importante</b>	1	1
<b>Ligeramente más importante</b>	3	1/3
<b>Más importante</b>	5	1/5
<b>Mucho más importante</b>	7	1/7
<b>Absolutamente más importante</b>	9	1/9

Tabla 16: Escala simplificada

Término lingüístico (i respecto a j)	Valor numérico	
	$a_{ij}$	$a_{ji}$
<b>Mucho menos importante / Mucho más importante</b>	1/5	5
<b>Menos importante / Más importante</b>	1/3	3
<b>Igualmente importante</b>	1	1

Aplicando esta escala en la comparación del conjunto de criterios, se obtiene una matriz recíproca [A] de dimensiones n x n formada por elementos que verifican la expresión  $a_{ij} * a_{ji} = 1$ . La consistencia de las comparaciones efectuadas se mide a partir del máximo autovalor de la matriz ( $\lambda_{m\acute{a}x}$ ). Esta matriz [A] es totalmente consistente cuando  $\lambda_{m\acute{a}x} = n$ , volviéndose más inconsistente a medida que el autovalor crece de acuerdo a la ecuación (3).

$$C. R. = \frac{C.I.}{R.I.} < 0,1 \quad (3)$$

Donde C.R es el ratio de consistencia, C.I es el índice de consistencia y R.I es el índice de consistencia aleatoria. El índice de consistencia se calcula de acuerdo a la ecuación (4).

$$C.I. = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad (4)$$

Por su parte, el índice de consistencia aleatoria, que representa la media de todos los índices de consistencia de una comparación por pares generada de forma aleatoria, se obtiene de la [Tabla 17](#) y, como puede verse, depende únicamente del tamaño de la matriz.

**Tabla 17:** Índice de consistencia aleatoria (R.I.)

Tamaño de la matriz (n)	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R.I.	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,25	1,49

### 3.3.4.3. Ranking de las propuestas

El objetivo final del análisis multicriterio es realizar una valoración de las propuestas planteadas para así obtener un ranking de preferencia de las mismas. Esta meta se ha alcanzado utilizando el método TOPSIS, originalmente desarrollado por Hwang y Yoon [34]. El método se basa en el principio de que la mejor propuesta será la más cercana a la solución ideal positiva (PIS-Positive Ideal Solution) y la más alejada de la solución negativa (NIS-Negative Ideal Solution). La aplicación del método TOPSIS se desarrolla de acuerdo a los siguientes pasos:

- 1) Definición de la matriz de toma de decisiones.** Esta matriz contiene la puntuación  $r_{ij}$  de para cada una de las alternativas  $A_i < i = 1, 2, \dots, m >$  respecto a cada uno de los criterios considerados  $C_j < j = 1, 2, \dots, n >$ . Esta matriz se define en el apartado 4.3.2 (ver [Tabla 23](#)).
- 2) Normalización de la matriz de toma de decisiones.** Los valores normalizados  $n_{ij}$  se calculan aplicando la ecuación (5).

$$n_{ij} = \frac{r_{ij} - \min(r_{ij})}{\max(r_{ij}) - \min(r_{ij})} \quad (5)$$

- 3) Determinar la matriz de decisión ponderada normalizada.** El valor ponderado normalizado  $v_{ij}$  se calcula según la ecuación (6).

$$v_{ij} = w_j \cdot n_{ij} \quad (6)$$

donde  $w_j$  es el peso del criterio  $j$ , de forma que  $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ .

- 4) Calcular la Solución Ideal Positiva (PIS) y la Negativa (NIS).** La solución ideal positiva se calcula con la ecuación (7) y la negativa con la ecuación (8).

$$A^+ = [(\max_i v_{ij} \forall j \in J), (\min_i v_{ij} \forall j \in J')] \quad (7)$$

$$A^- = [(\min_i v_{ij} \forall j \in J), (\max_i v_{ij} \forall j \in J')] \quad (8)$$

donde J se asocia con los criterios de beneficio y J' con los de coste.

- 5) **Determinar la distancia de cada propuesta a  $A^+$  y  $A^-$ .** La medida de la distancia se determina utilizando la distancia Euclídea n-dimensional mediante las ecuaciones (9) y (10).

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

- 6) **Calcular la cercanía relativa de cada alternativa a la solución ideal.** La cercanía relativa de una alternativa  $A_i$  con respecto a la solución ideal se define según la ec. (11).

$$R_j = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}, i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

siendo  $0 \leq R_j \leq 1$ . Así pues, cuanto más se acerque la solución de una propuesta a la unidad, mejor será la zona de ubicación planteada.



## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## 4.1. Introducción

En este capítulo se aplica la metodología definida anteriormente (ver capítulo 3) al caso de la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona. Dicha metodología se aplica en dos fases: en primer lugar se localizan las zonas adecuadas para la ubicación del vertedero utilizando herramientas SIG, y en segundo lugar se realiza una priorización de las mismas mediante un análisis multicriterio.

## 4.2. Delimitación de zonas adecuadas

Con ayuda de las herramientas SIG y aplicando las restricciones y limitaciones dadas por el desarrollo técnico del RD 1481/2001, se han obtenido una serie de planos de zonas no adecuadas para ubicar el vertedero, de acuerdo a los criterios descritos en la sección 3.1.

En el plano de áreas inestables (ver [Ilustración 30](#)) aparecen resaltadas las zonas obtenidas con una pendiente superior al 8%, en las cuales no podrá ubicarse el vertedero. El plano de áreas cársticas y cavidades subterráneas muestra también las zonas cársticas y el perímetro de las áreas de cuevas donde está restringida la ubicación del vertedero (ver [Ilustración 31](#)). En la [Ilustración 32](#), que hace referencia a la restricción de aguas superficiales, continentales y zonas costeras, aparecen los cursos de agua superficiales con un buffer sobre su eje de 100 metros a cada lado del mismo para aplicar la restricción de no ubicar un vertedero en zonas de servidumbre ni policía según el RDL 1/ 2001 [15]. Además, en este mismo plano aparecen las zonas inundables de período de retorno igual o inferior a 100 años. En el plano de aguas continentales subterráneas y acuíferos se marcan las zonas de vulnerabilidad alta de los acuíferos y aquellas en las cuales el nivel freático tiene una profundidad inferior a 14 metros (ver [Ilustración 33](#)). En la [Ilustración 34](#) aparecen los humedales situados en Navarra y un buffer de 1000 metros en torno a su perímetro. El siguiente plano, representado en la [Ilustración 35](#), muestra los espacios protegidos de Navarra en los que no se permite la ubicación del vertedero, al igual que sucede en las vías pecuarias (ver [Ilustración 36](#)). En el plano de zonas residenciales, de equipamientos sanitarios o educativos, aparecen los núcleos de población de Navarra y un buffer alrededor de los mismos de 1000 metros para cumplir la restricción que impide la ubicación de vertederos de RNP en dicho radio de acción (ver [Ilustración 37](#)). También se muestra el Camino de Santiago como figura del patrimonio cultural y un buffer sobre el eje del mismo de 100 metros a cada lado. Finalmente, la [Ilustración 38](#) representa el buffer de 3000 metros sobre el aeropuerto de Pamplona, donde tampoco se podrá ubicar el vertedero.

Una vez obtenidas las zonas no adecuadas asociadas a cada una de las restricciones, se han unido todas en un solo plano que se muestra en la [Ilustración 39](#), en el que se reflejan las zonas adecuadas y no adecuadas finales para la ubicación del vertedero.

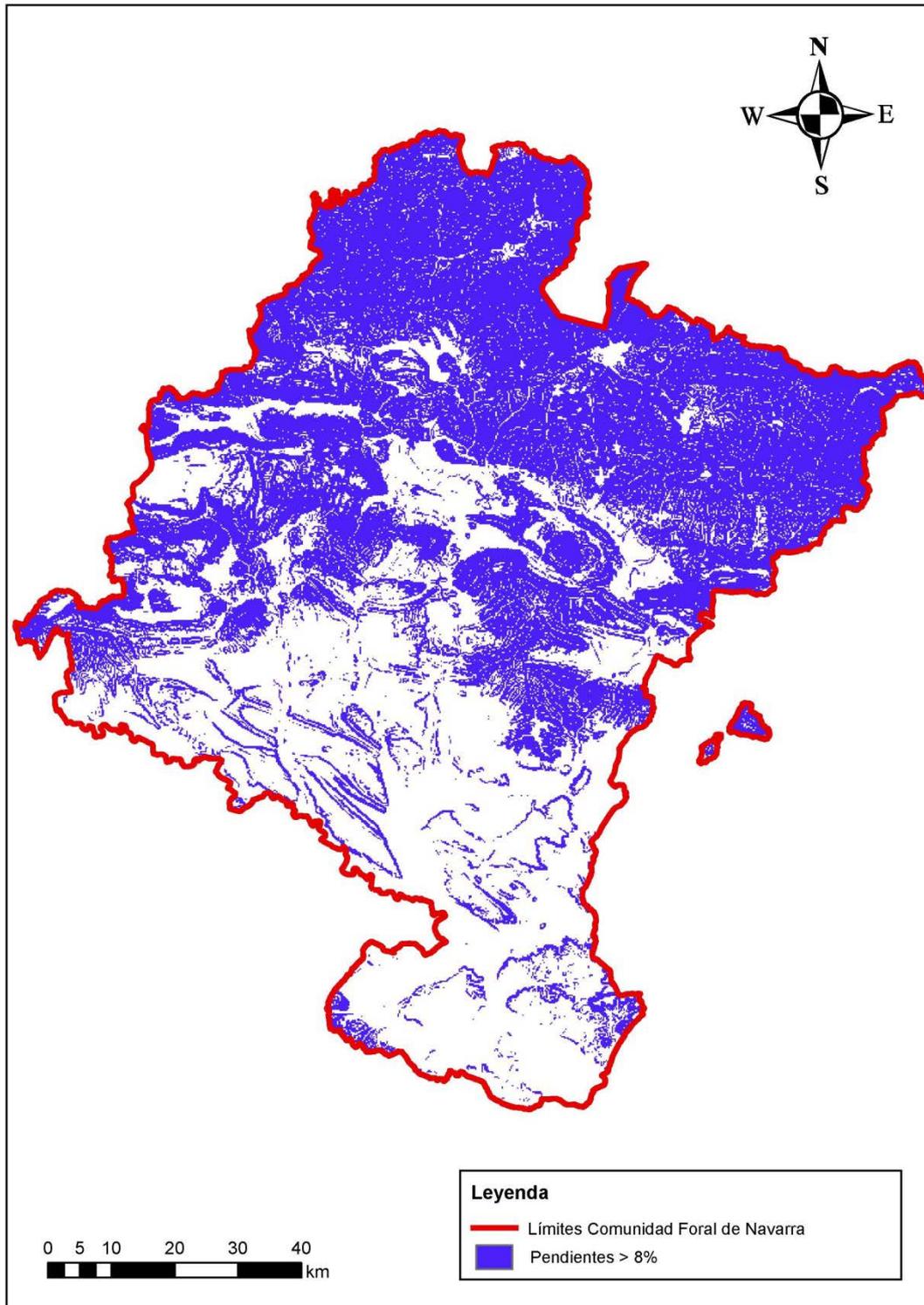
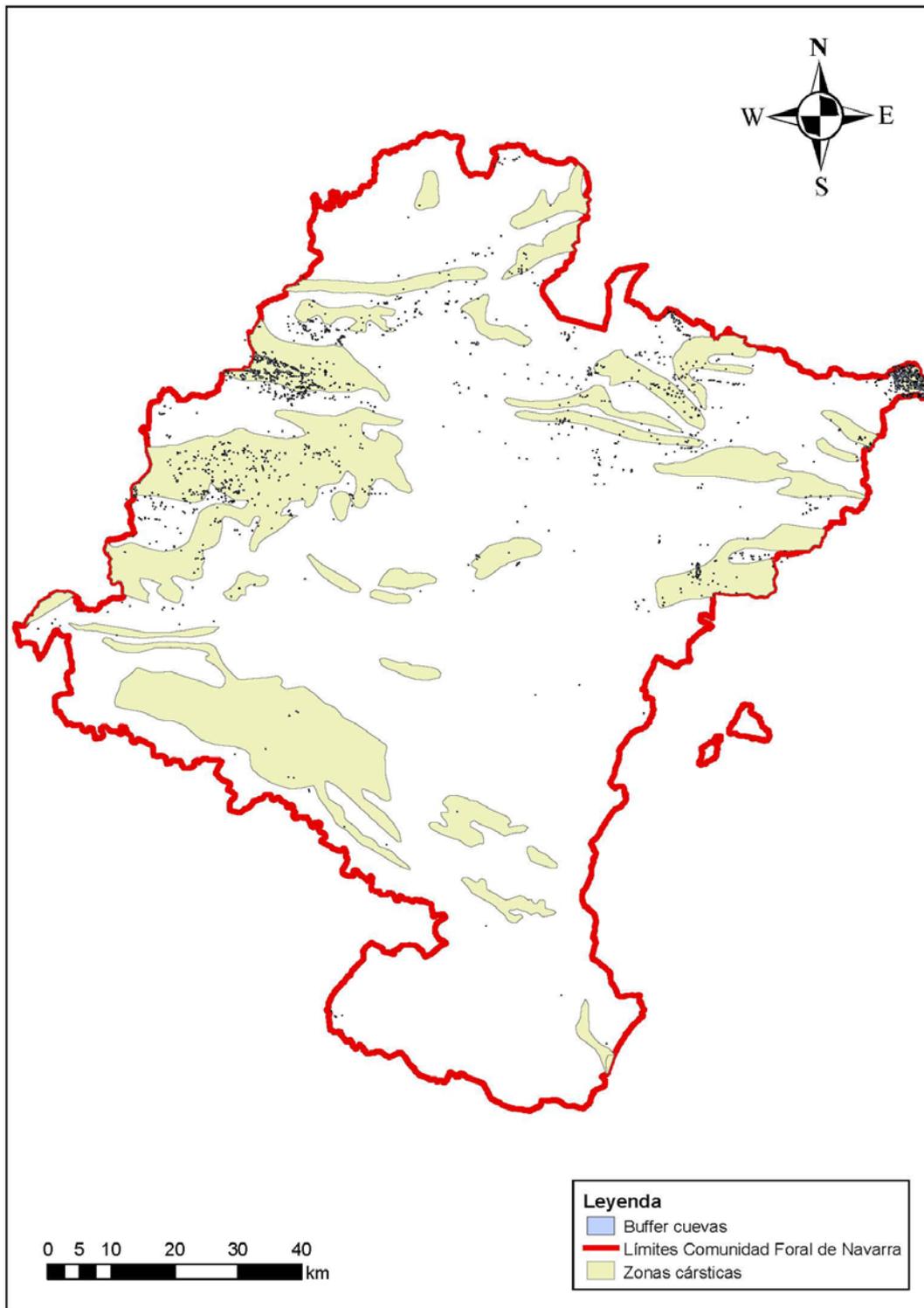


Ilustración 30: Áreas inestables



**Ilustración 31:** Áreas cársticas y cavidades subterráneas

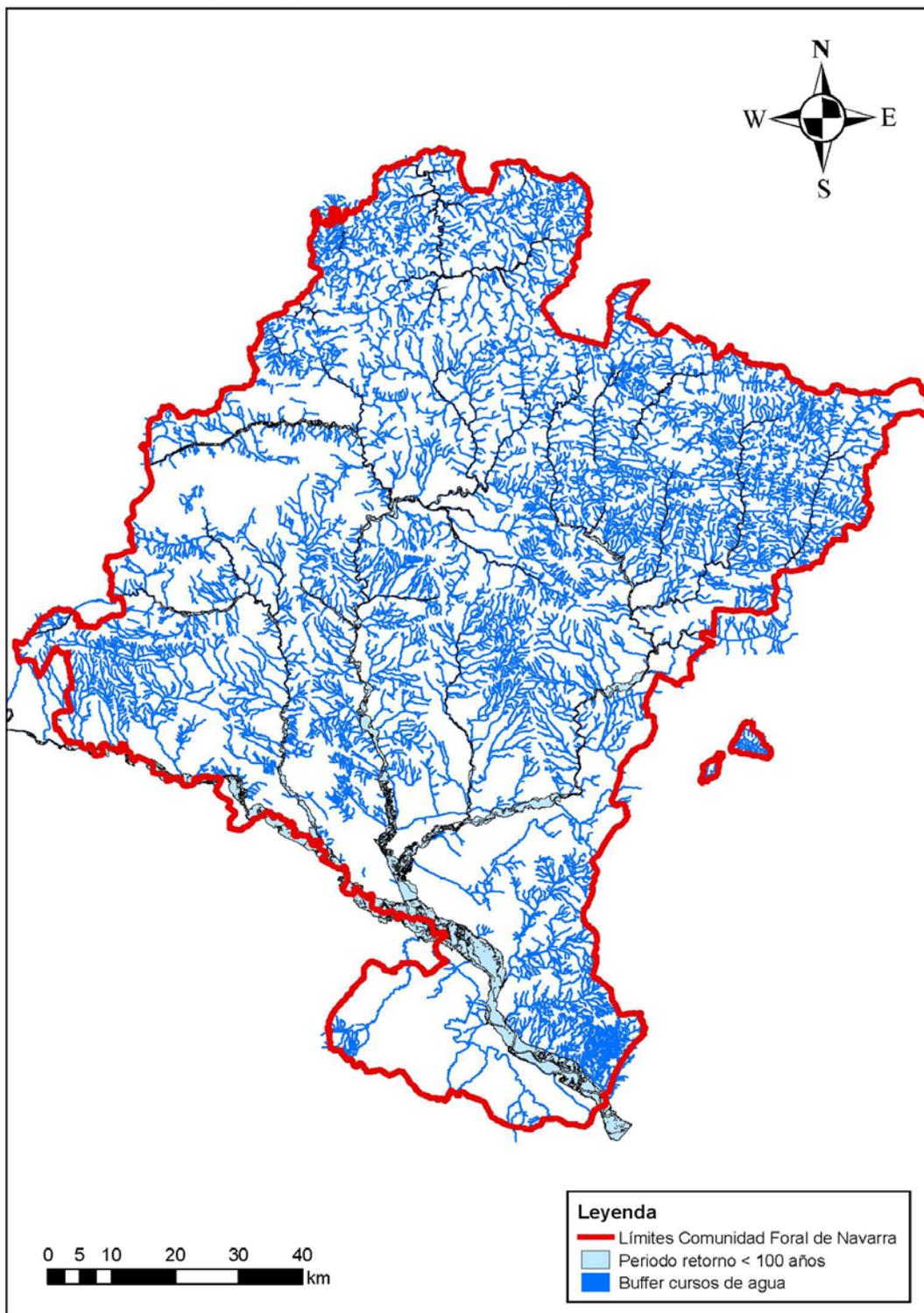
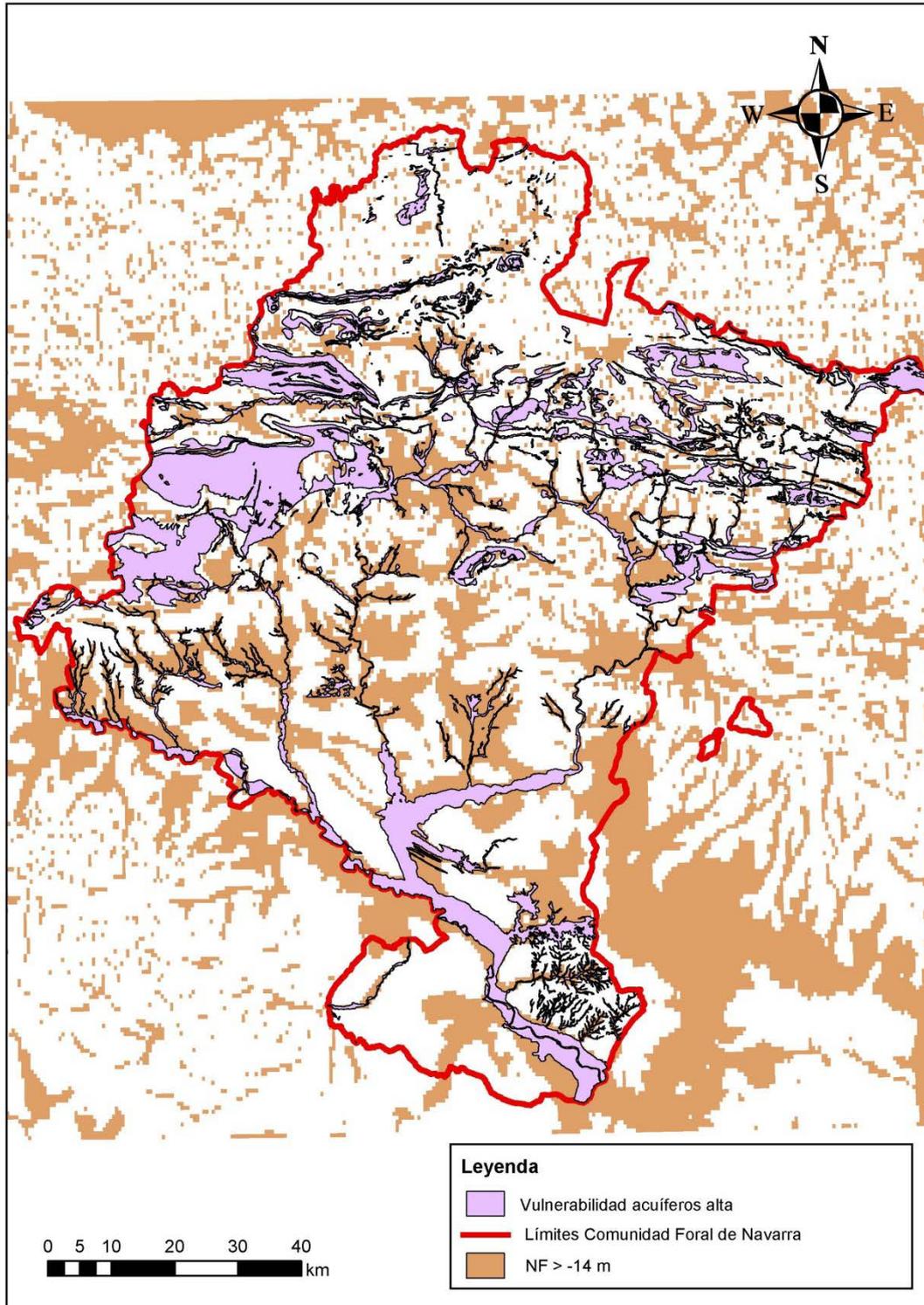
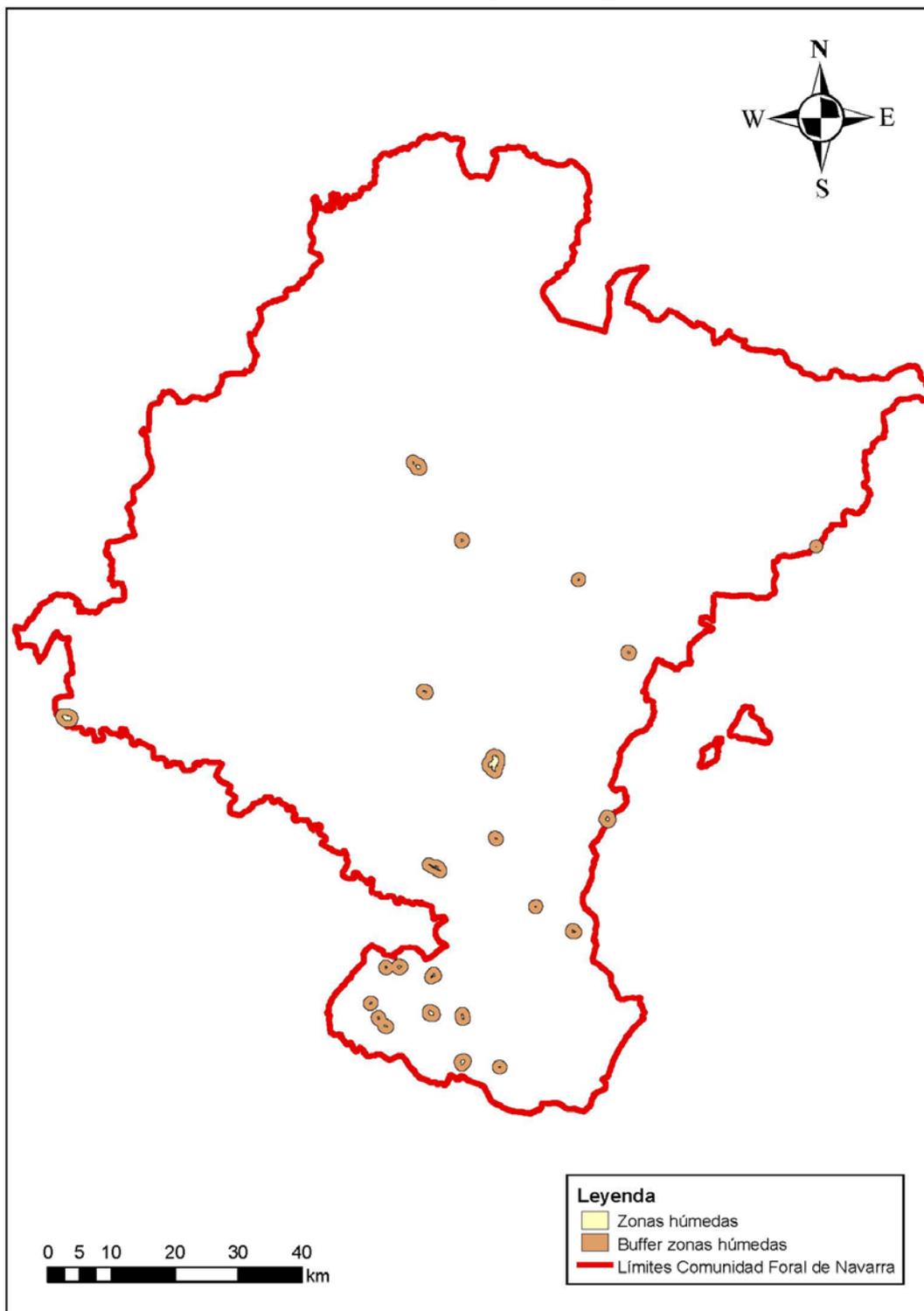


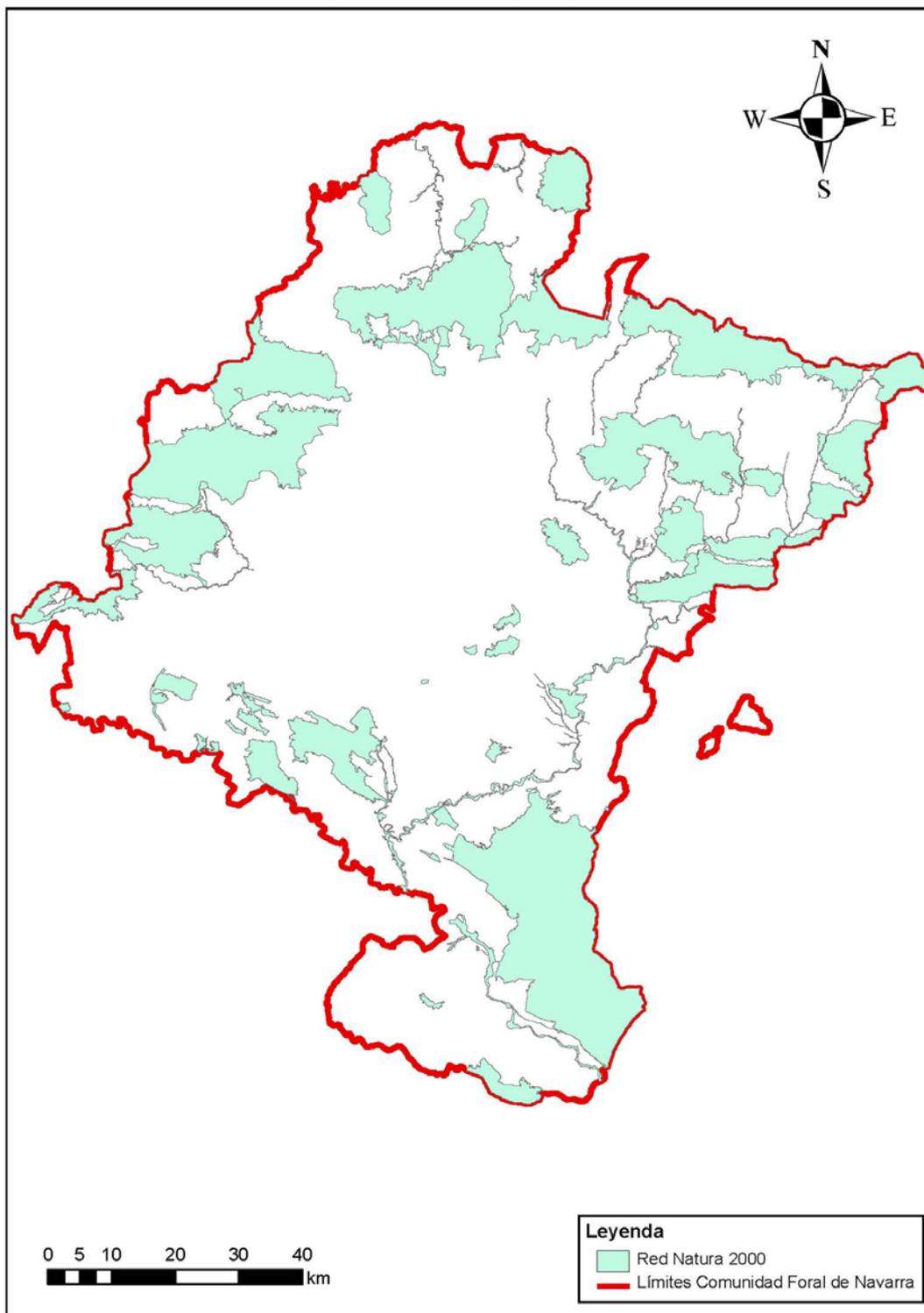
Ilustración 32: Aguas superficiales, continentales y zonas costeras



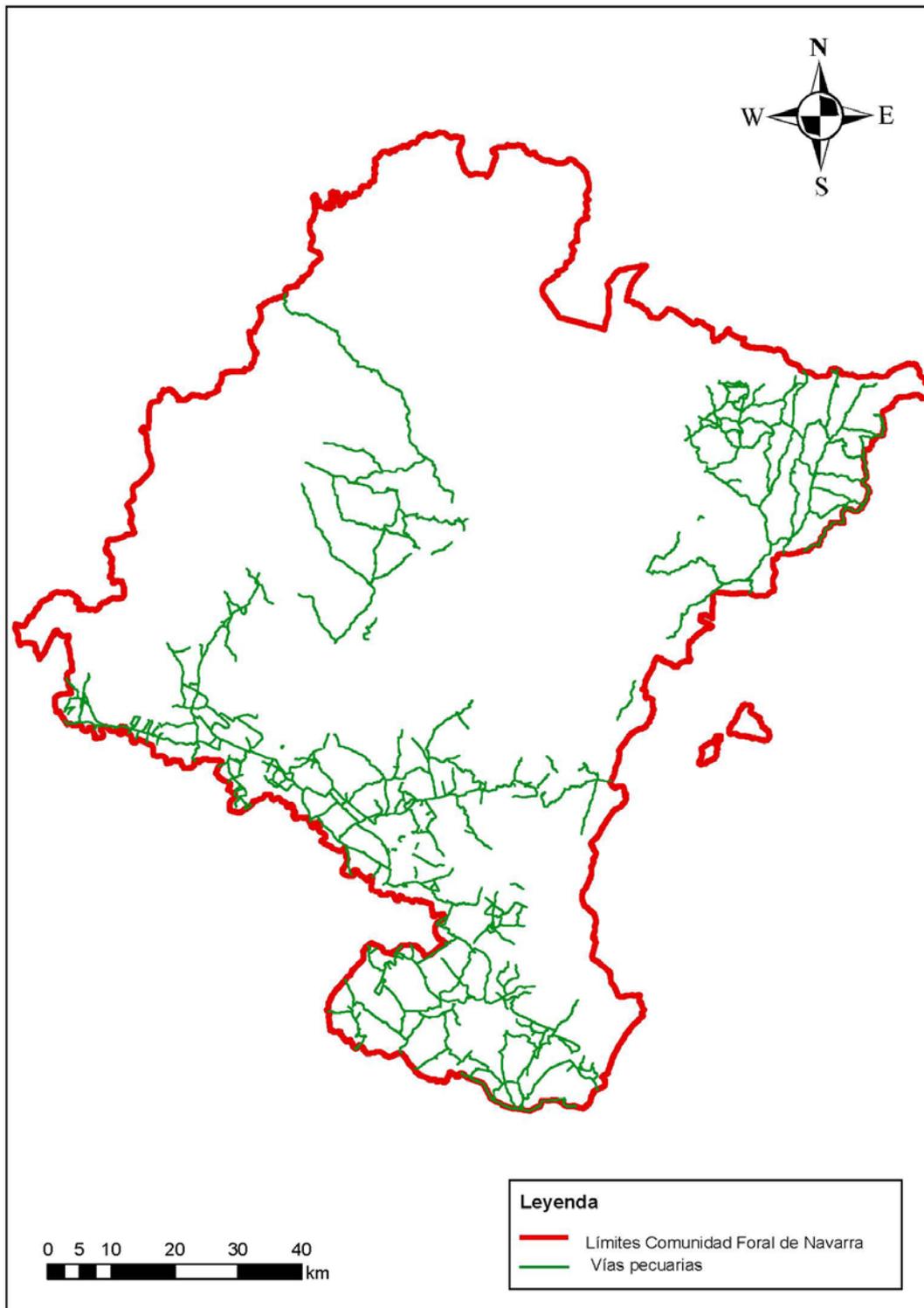
**Ilustración 33:** Aguas continentales, subterráneas y acuíferos



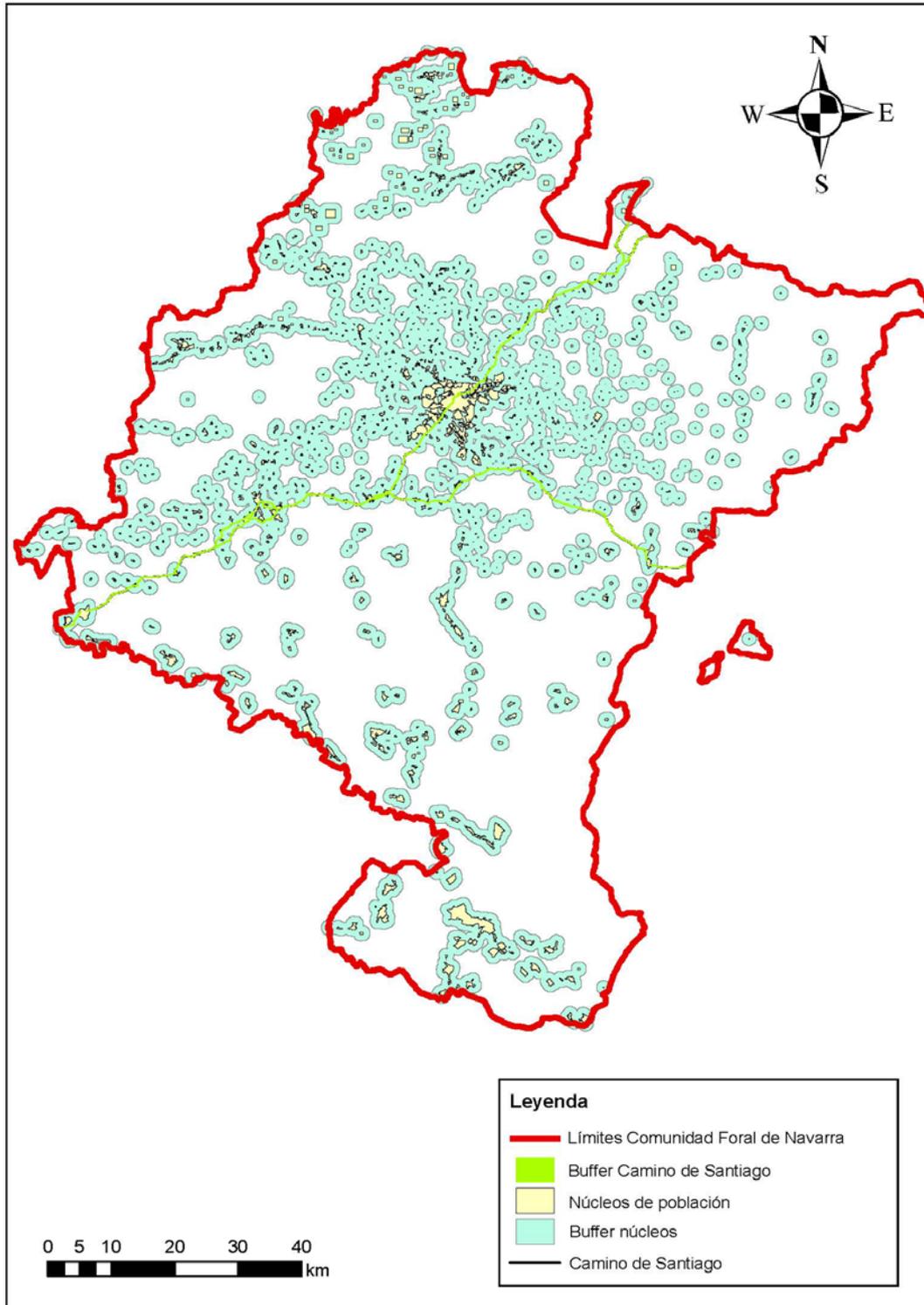
**Ilustración 34:** Zonas húmedas (humedales)



**Ilustración 35:** Espacios naturales protegidos



**Ilustración 36:** Vías pecuarias



**Ilustración 37:** Zonas residenciales, de equipamientos sanitarios o educativos

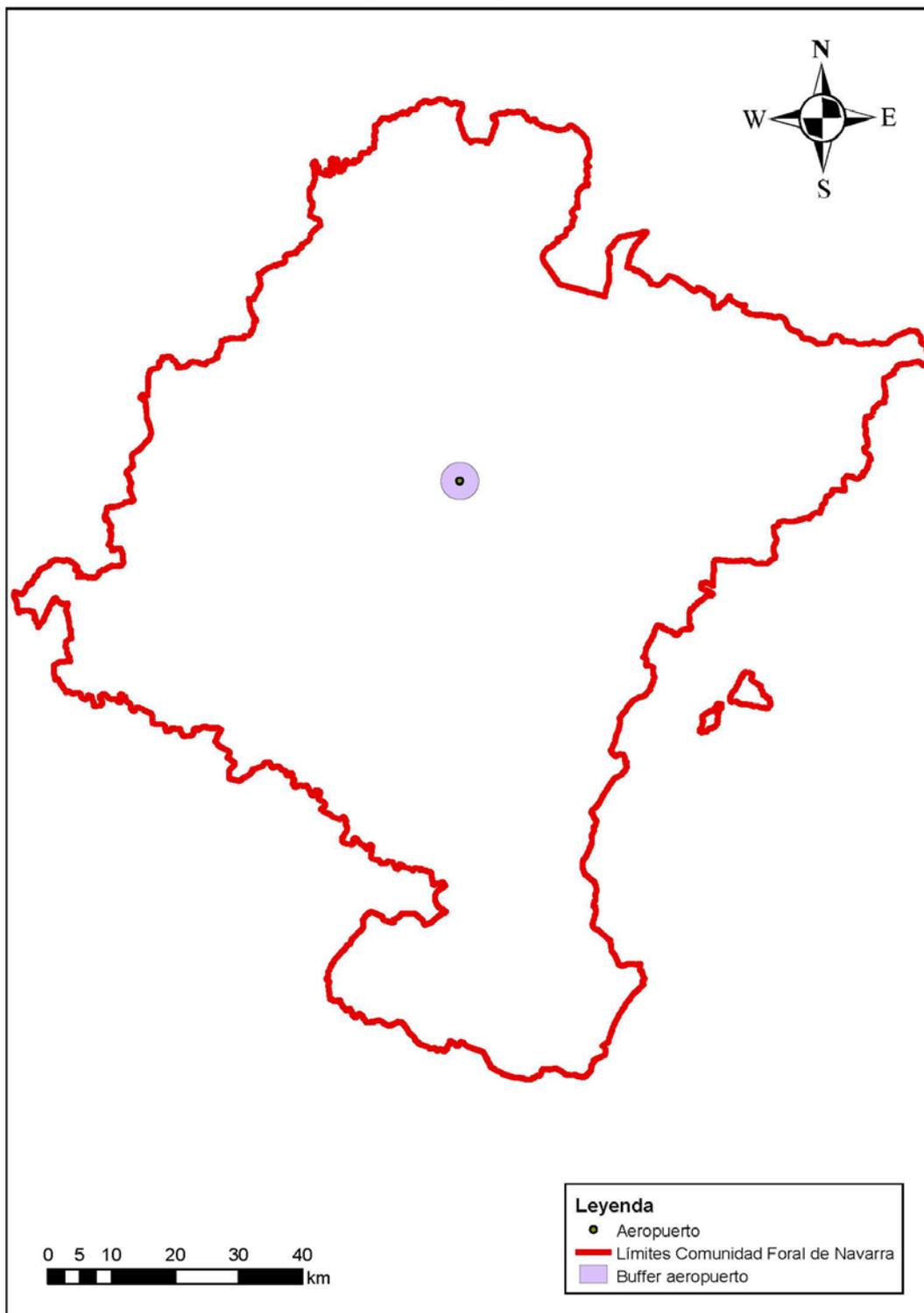


Ilustración 38: Seguridad aeroportuaria

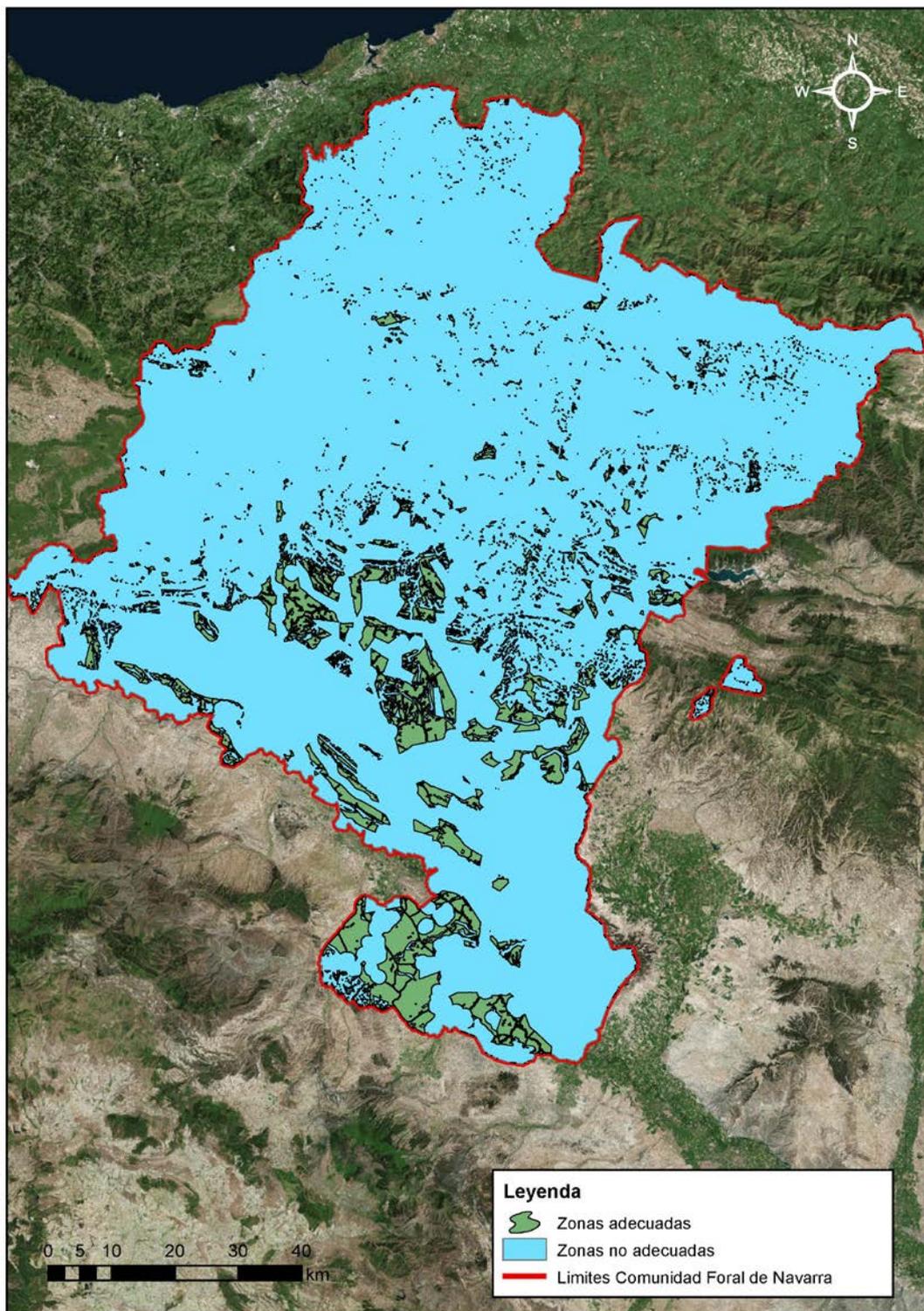


Ilustración 39: Zonas adecuadas para instalación del vertedero

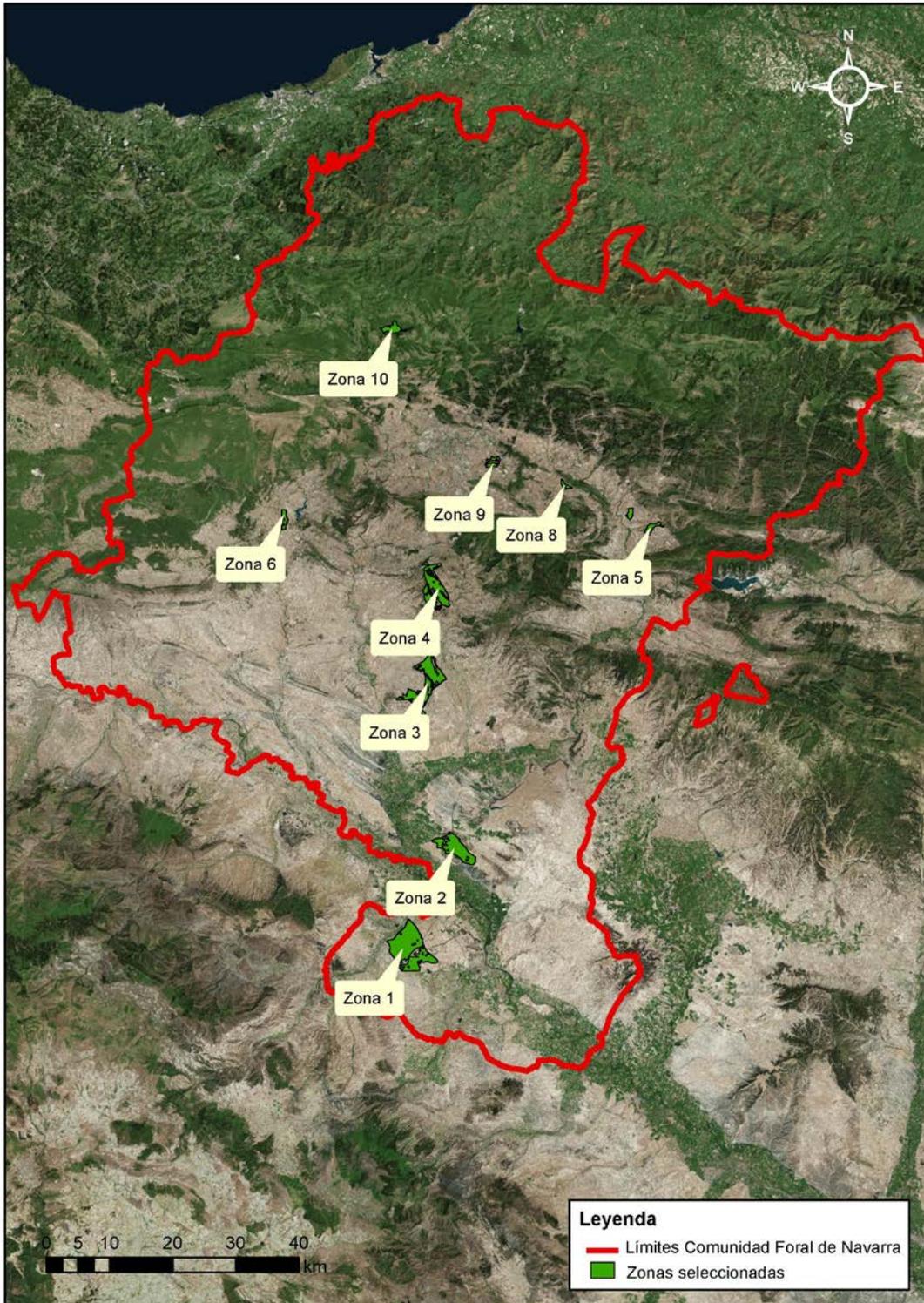
Como se puede apreciar en la [Ilustración 39](#), las superficies adecuadas para ubicar el vertedero, se concentran sobre todo en el centro sur de la provincia. Esto se debe sobre todo a que la parte norte es más montañosa, con pendientes superiores al 8% (ver [3.1.1.1](#)). Además, en el centro de Navarra se localiza gran parte de la población

de la comunidad, con muchos núcleos urbanos bastante próximos entre ellos, con lo que se descartan las zonas próximas a Pamplona. La parte suroeste abarca una gran superficie de Espacio Protegido, lo que la convierte también en zona no adecuada para ubicar el vertedero.

Finalmente, de entre las zonas adecuadas, se han seleccionado 10 ubicaciones posibles repartidas por Navarra (ver [Ilustración 40](#)), de acuerdo a criterios de superficie, por los cuales se considera un valor mínimo para la ubicación del vertedero de 40 hectáreas [9]. Para la selección de zonas también se tuvieron en cuenta criterios de proximidad, evitando seleccionar zonas muy juntas aunque cumpliesen los criterios mínimos de superficie, ya que resultaría un análisis redundante. Se trata, por tanto, de realizar un análisis sobre 10 zonas en las que se representen diferentes situaciones de estudio: más cercanas a poblaciones, más cercanas a Espacios Protegidos, más alejadas del centro productor de residuos, etc.

Realizando un análisis a priori, las zonas más cercanas al centro productor generarán menores emisiones y costes debido al transporte de los residuos pero pueden dar lugar a mayores afecciones a la población por la concentración de la misma próxima al centro productor. Aquellas zonas más alejadas provocarán mayores impactos sobre el medio ambiente y mayores costes de transporte, pero generarán en cambio menos molestias a la población. A medida que las ubicaciones se alejan de las zonas más montañosas y se aproximan más al sur de la comunidad, las temperaturas medias invernales tienden a ser menos extremas, con lo que se puede suponer que los costes de funcionamiento serán menores.

Estas apreciaciones demuestran que existen muchos criterios implicados en la ubicación del vertedero, muchos de ellos en conflicto entre ellos (el incremento de uno de ellos implica el decremento de otro y viceversa). Por tanto, es necesario aplicar un análisis multicriterio para facilitar la toma de decisiones, tal y como se expone en el apartado [4.3](#).



**Ilustración 40:** Zonas seleccionadas para el análisis multicriterio

### 4.3. Priorización de zonas

Una vez seleccionadas las zonas de posible ubicación del vertedero, se calculan los valores de cada subcriterio con ayuda de los SIG. En las siguientes ilustraciones (ver de [Ilustración 41](#) a [Ilustración 51](#)) se muestra cómo se ha obtenido el valor de cada uno de los subcriterios para cada alternativa.

Para caracterizar el subcriterio de expropiaciones, se han generado unos polígonos con una superficie de unas 40 hectáreas que se han ubicado en las zonas propuestas. En estas zonas se han obtenido las superficies de cada uno de los distintos grupos de cultivos que se incluyen en la tabla que aparece en la [Ilustración 41](#). En el subcriterio sobre material de cobertura (ver [Ilustración 42](#)) se ha seguido un proceso similar, utilizando una tabla con los materiales de cobertura en dichas zonas como base. El subcriterio de coste de transporte de los residuos (ver [Ilustración 43](#)) aparece delimitado mediante las distancias desde el centroide del vertedero hasta el punto de tratamiento previo al vertido de los residuos (en este caso, el centro de tratamiento de Góngora), que servirán para el cálculo de los costes de transporte de los residuos. Terminando con el criterio económico, el subcriterio de coste de funcionamiento (ver [Ilustración 44](#)) se ha modelado interpolando las temperaturas medias invernales en Navarra. En la tabla que acompaña la ilustración se recogen los valores de las temperaturas medias invernales en los puntos de ubicación de los vertederos.

En cuanto al criterio ambiental, el subcriterio de emisiones (ver [Ilustración 45](#)) sigue un esquema similar al subcriterio de costes de transporte, aunque esta vez las distancias se tendrán en cuenta para calcular las emisiones al medio ambiente. La [Ilustración 46](#) muestra los valores de los distintos niveles de vulnerabilidad de los acuíferos. En relación al subcriterio de distancia a la Red Natura, en la [Ilustración 47](#) aparecen las zonas protegidas de Navarra y su distancia a las propuestas que se recogen en la tabla que acompaña a la ilustración. Por su parte, el subcriterio de generación de lixiviados sigue un patrón similar al del coste de funcionamiento (ver [Ilustración 48](#)). En la imagen aparece la interpolación de la precipitación media en milímetros para el territorio de Navarra y se recoge la pluviometría de cada una de las zonas del análisis.

Finalmente, dentro del criterio social, el subcriterio de cercanía a núcleos de población (ver [Ilustración 49](#)) muestra la población afectada en un radio de 5 km desde el vertedero para cada una de las zonas. El subcriterio sobre visibilidad de vertederos (ver [Ilustración 50](#)) recoge los puntos del terreno visibles (píxeles) desde cada una de las zonas propuestas. Por último, el subcriterio de vientos (ver [Ilustración 51](#)) representa la población afectada por olores, de acuerdo a una ponderación en función de la distancia al vertedero hasta alcanzar un radio de 5 km de las zonas de vertido.

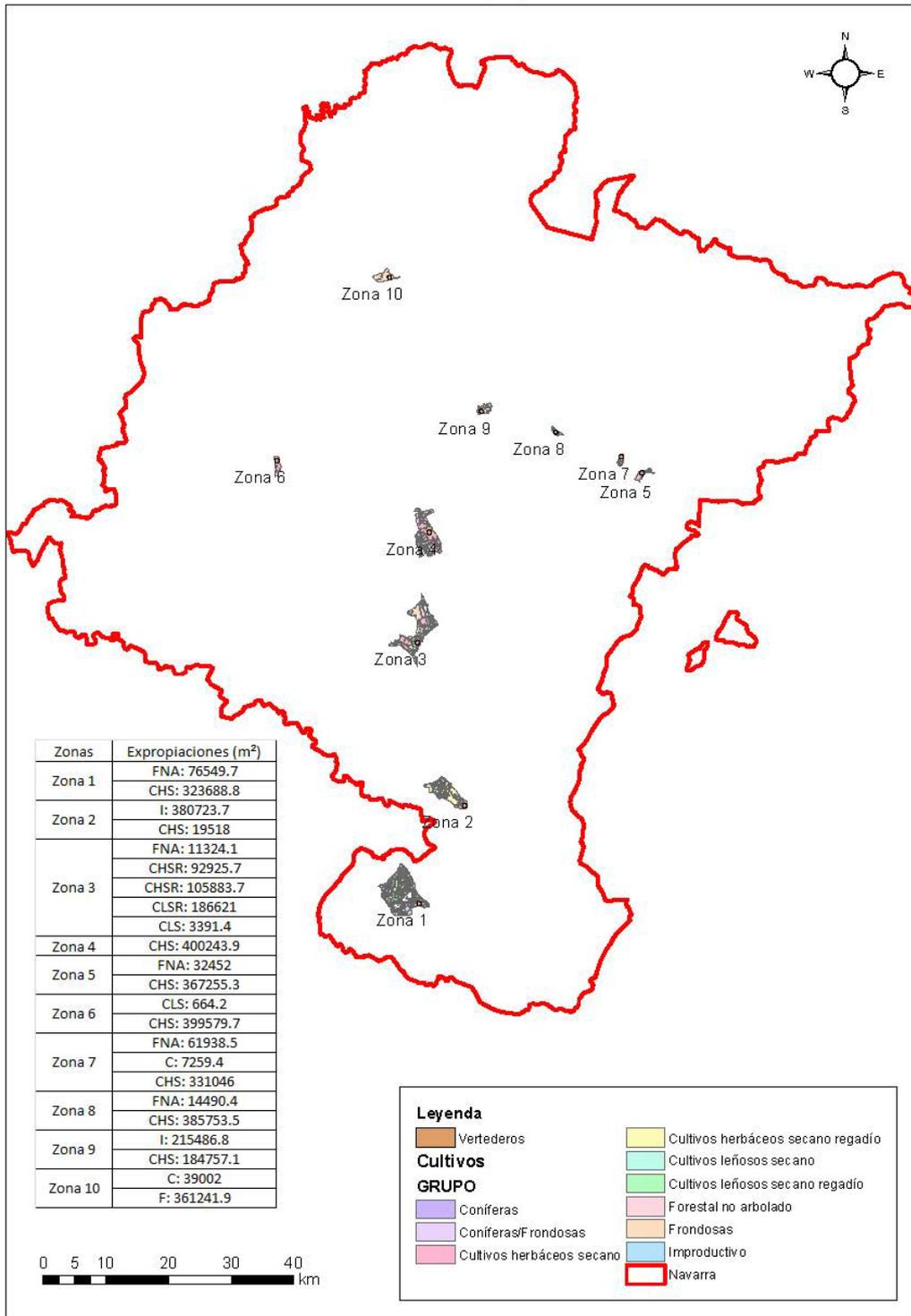


Ilustración 41: Expropiaciones

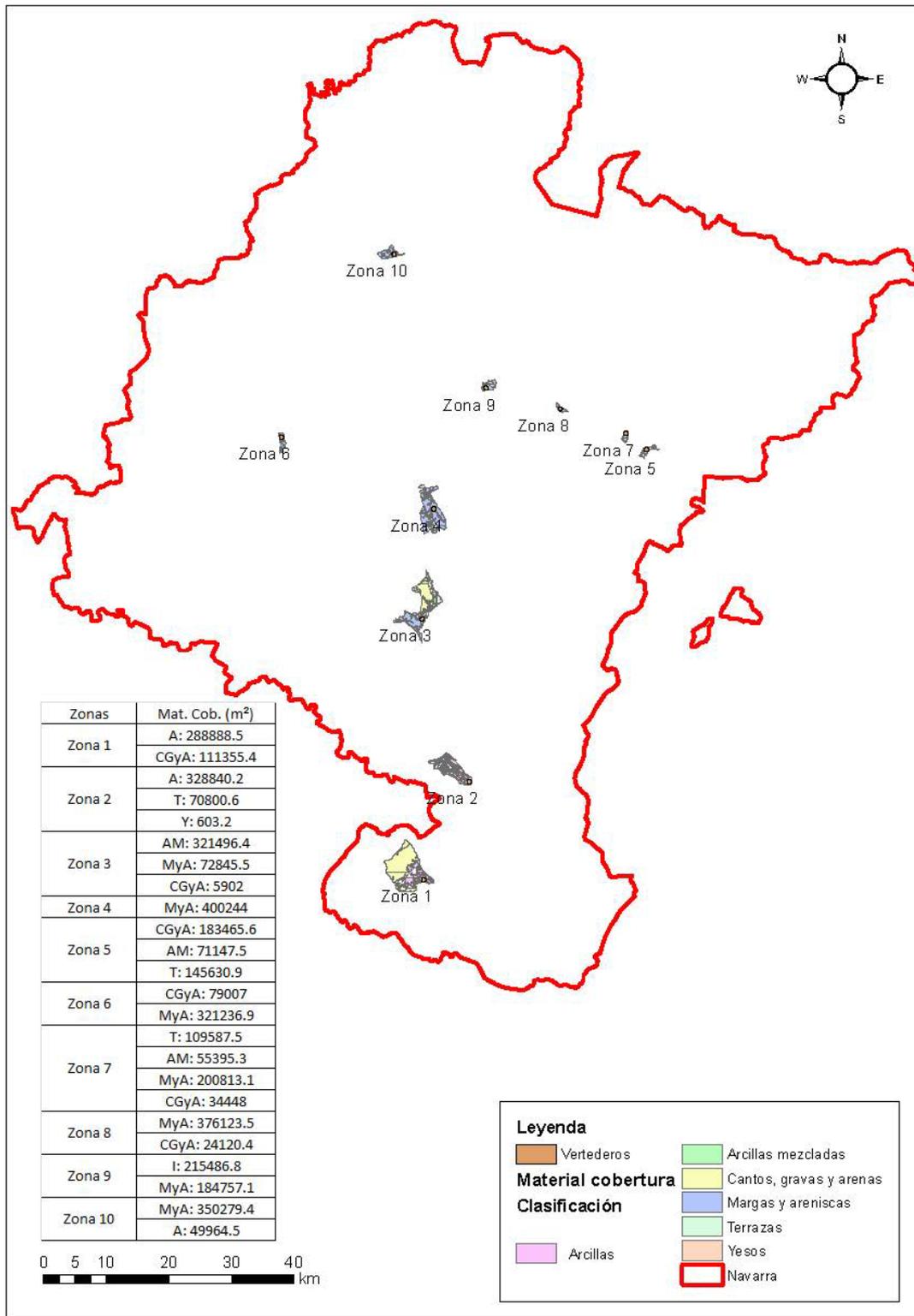


Ilustración 42: Material de cobertura

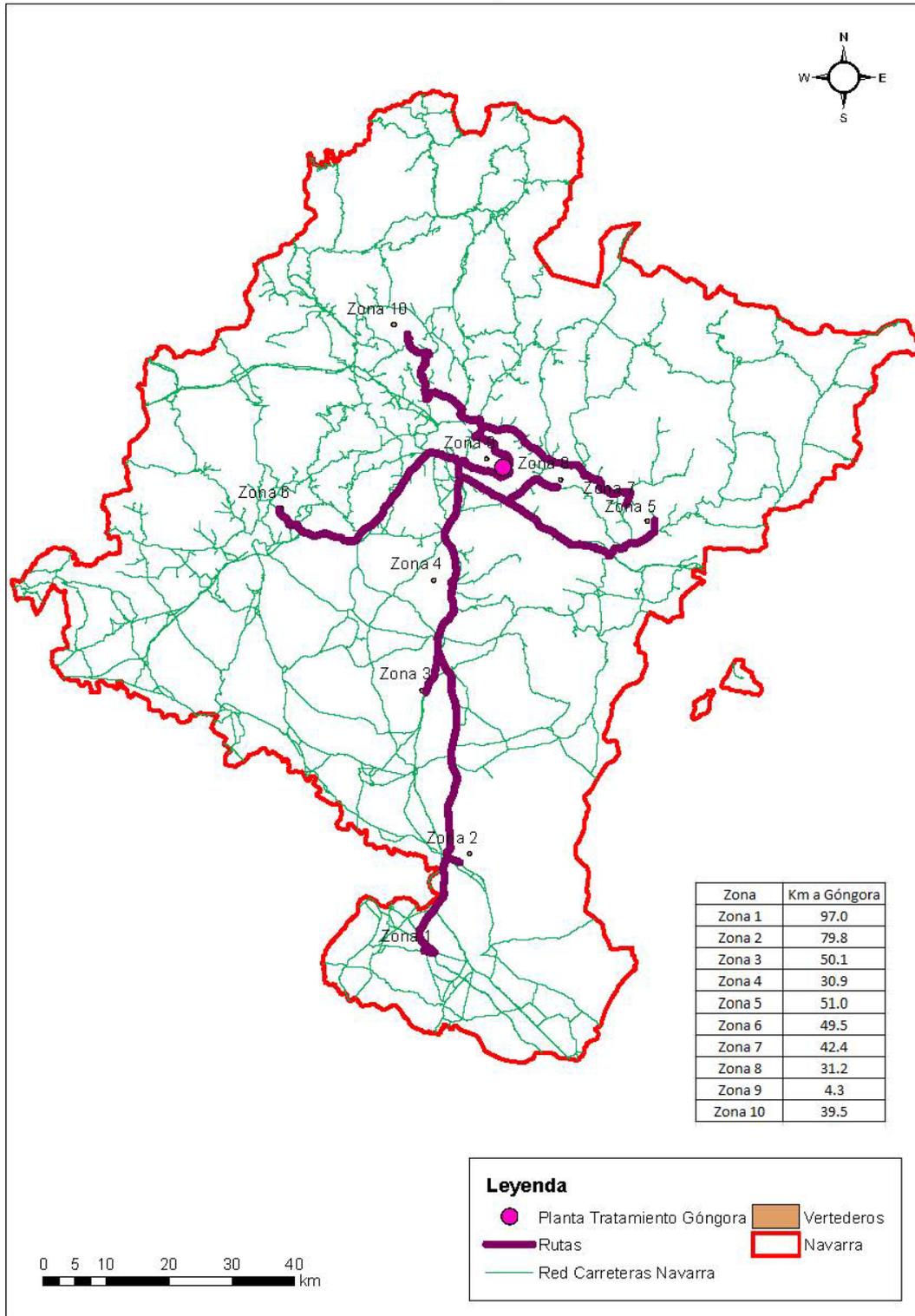


Ilustración 43: Coste de transporte de los residuos

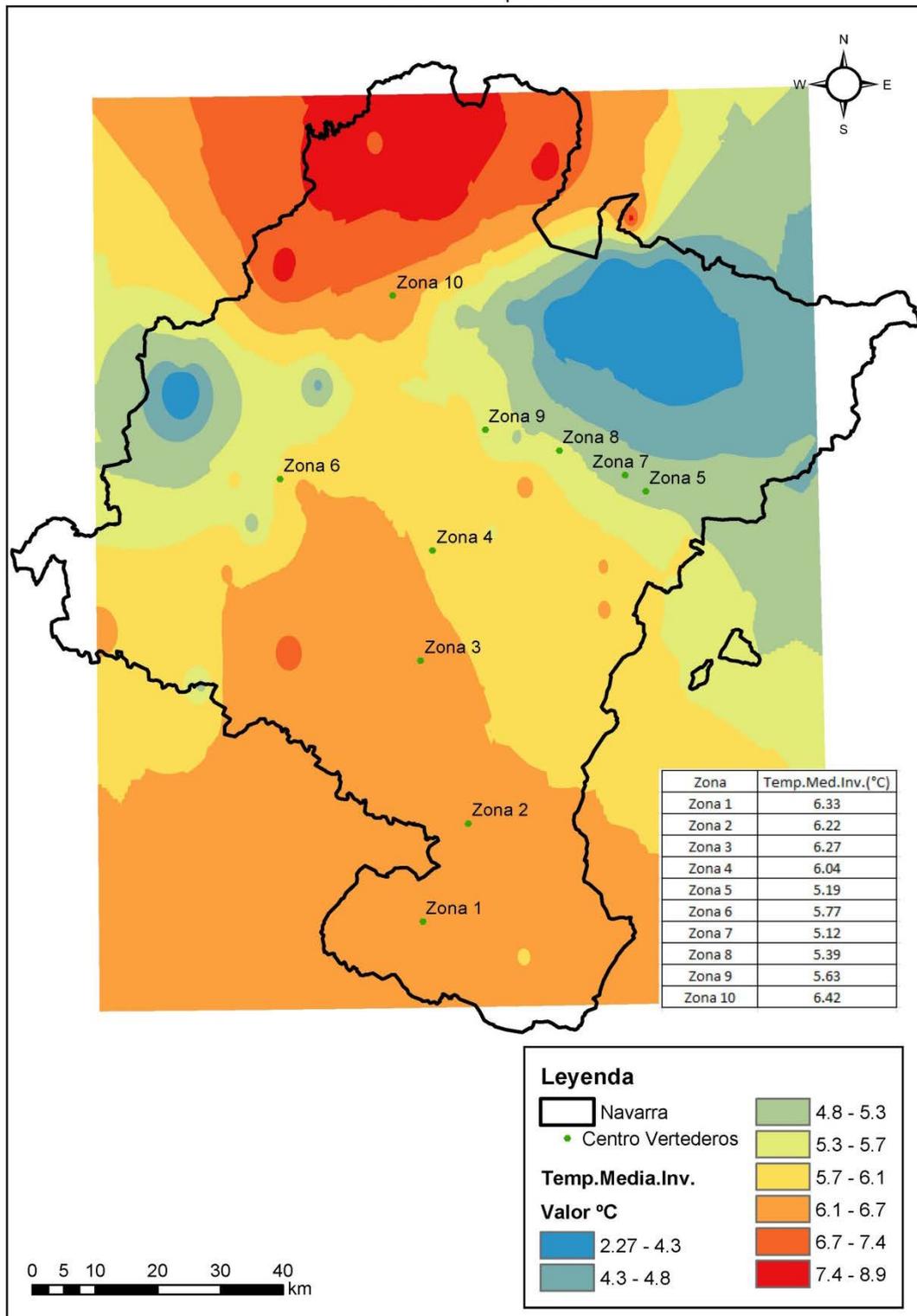


Ilustración 44: Coste de funcionamiento (temperaturas)

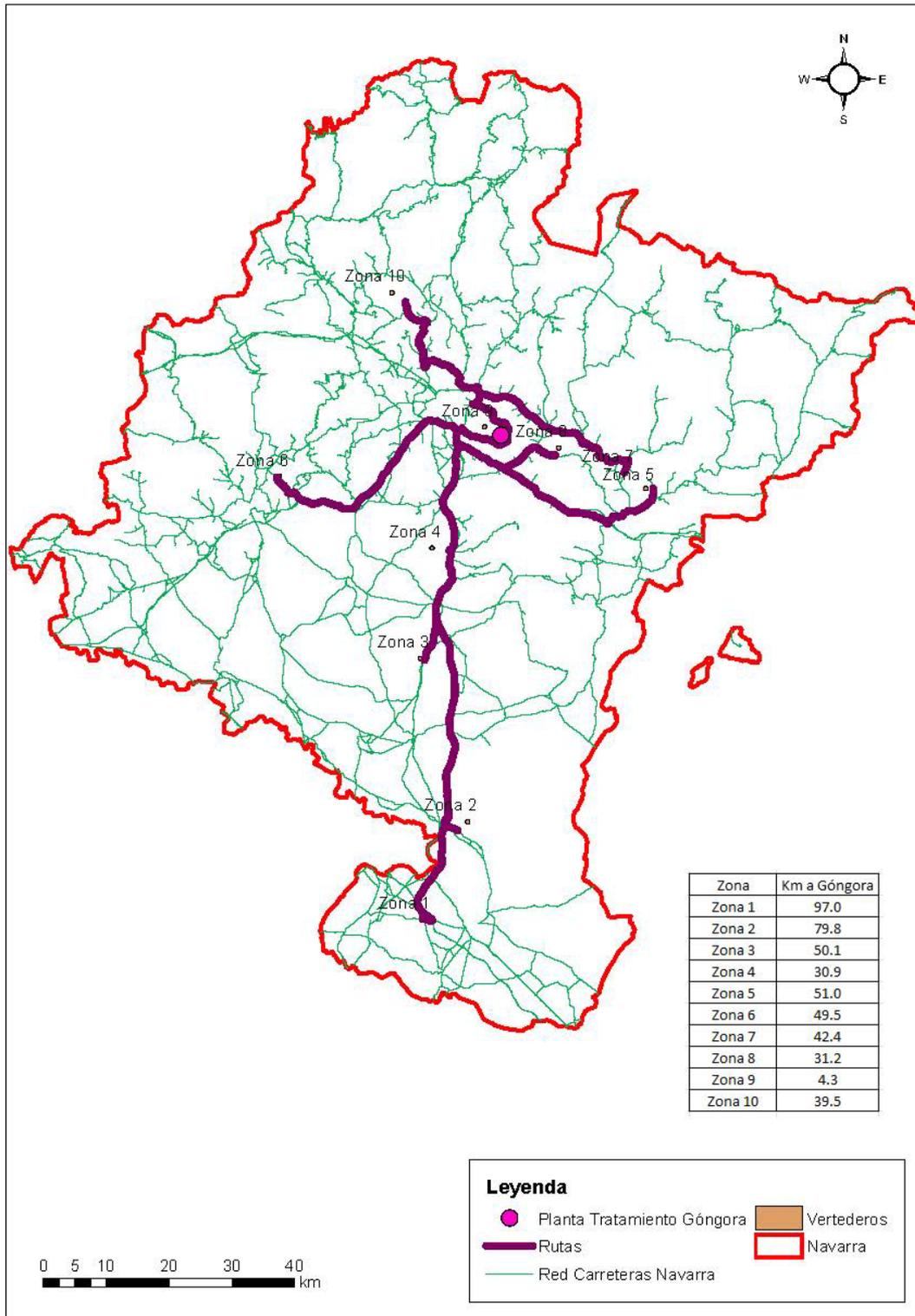


Ilustración 45: Emisiones

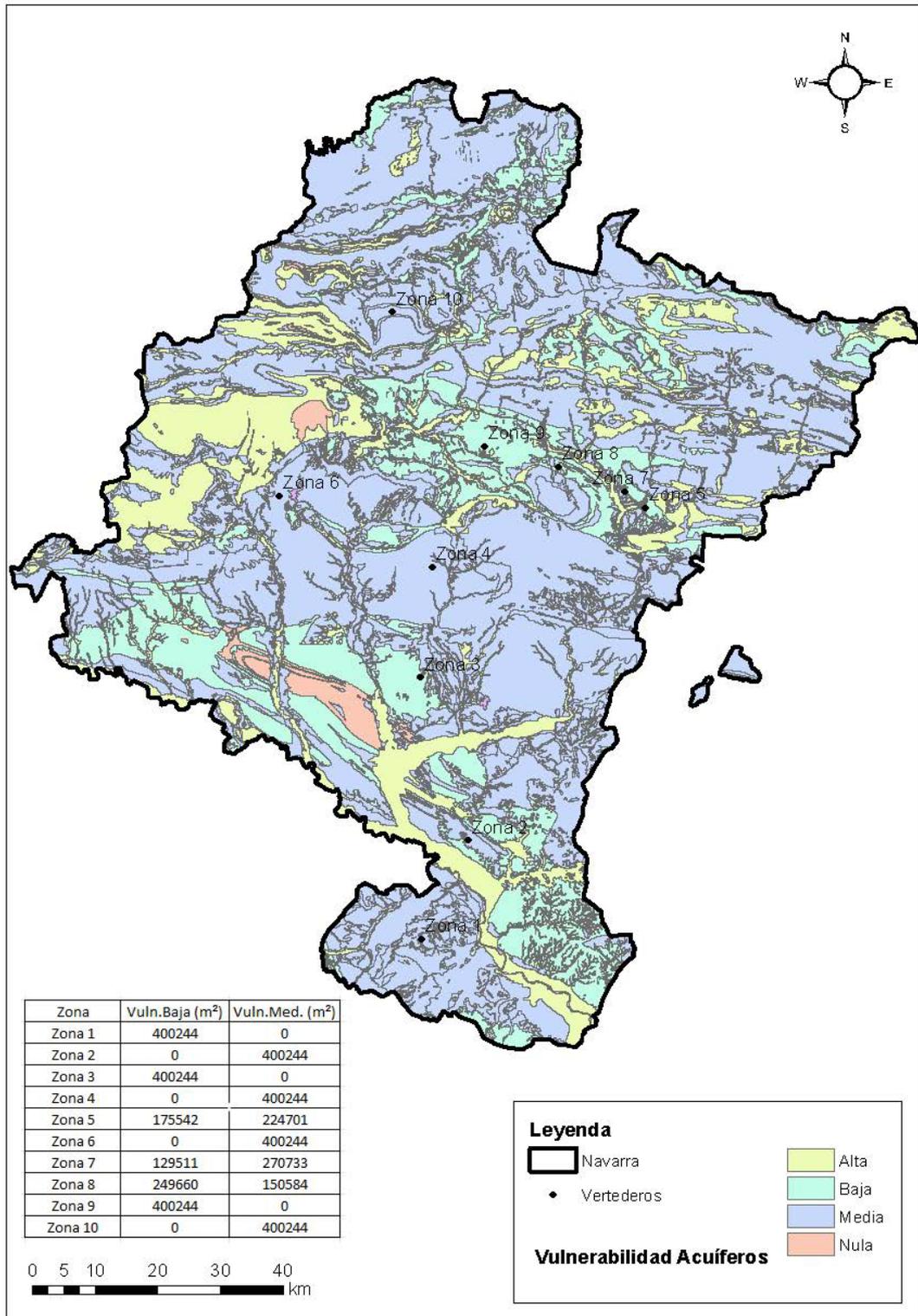


Ilustración 46: Vulnerabilidad de los acuíferos

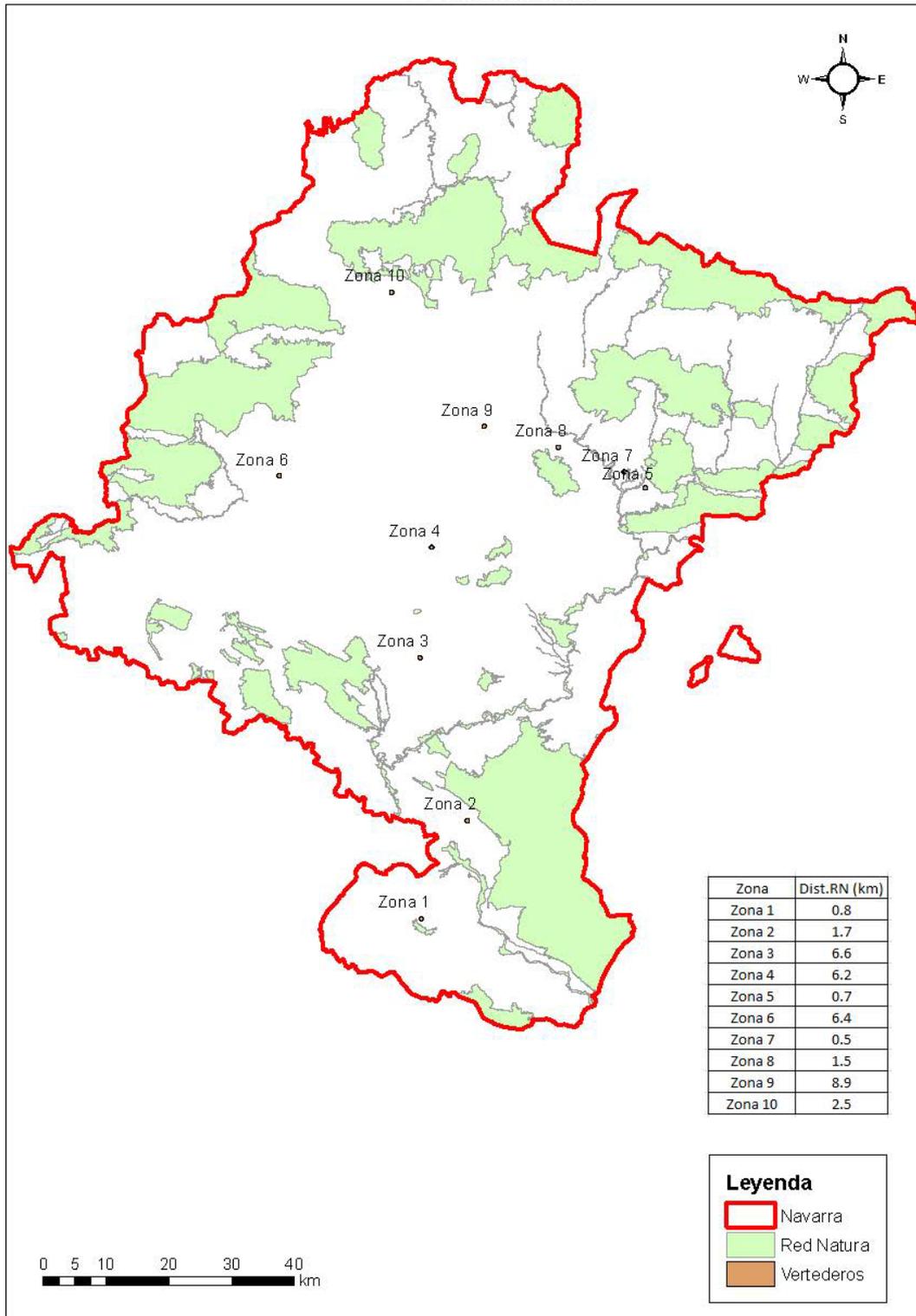
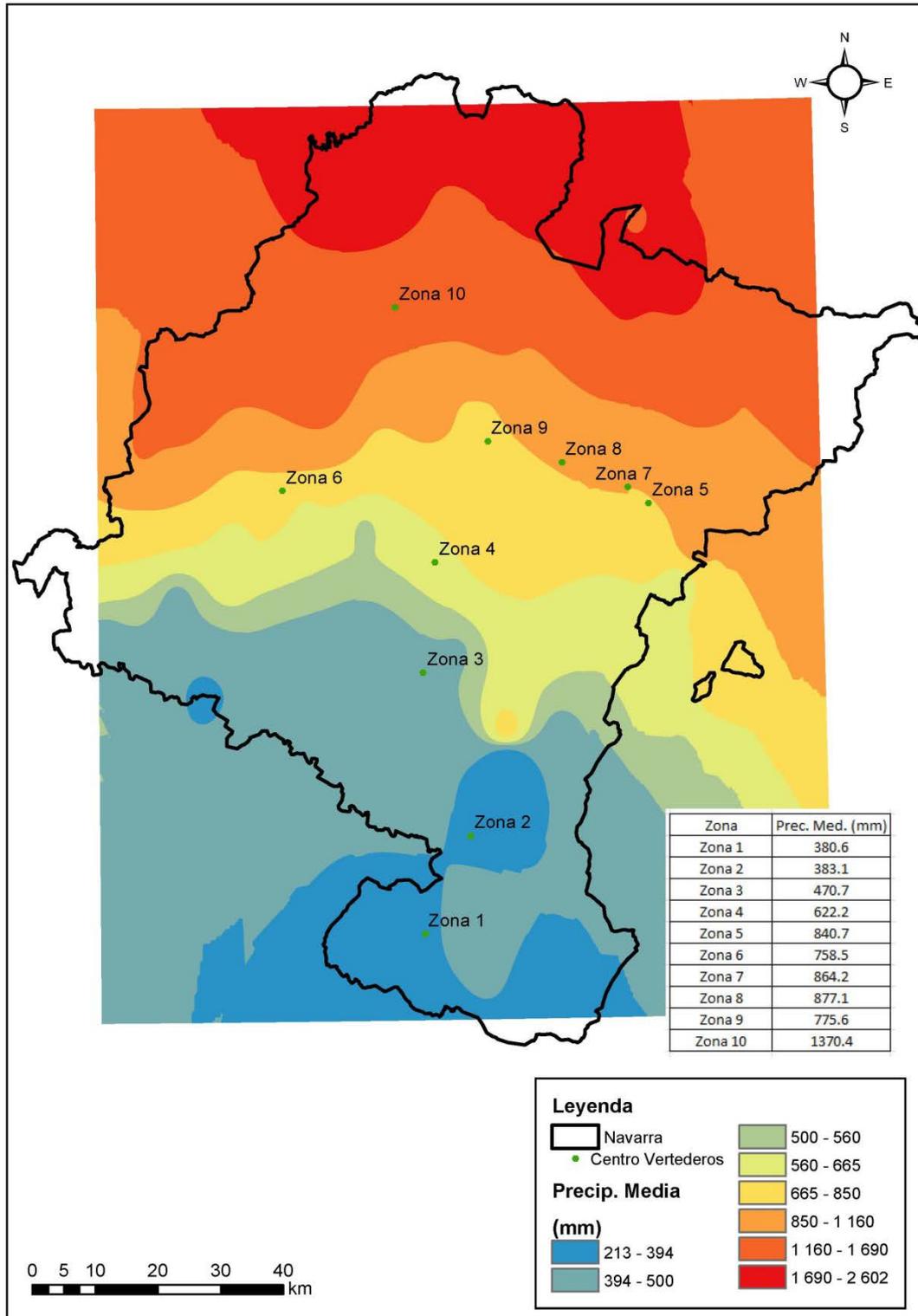


Ilustración 47: Proximidad a la Red Natura



**Ilustración 48:** Generación de lixiviados (precipitaciones)

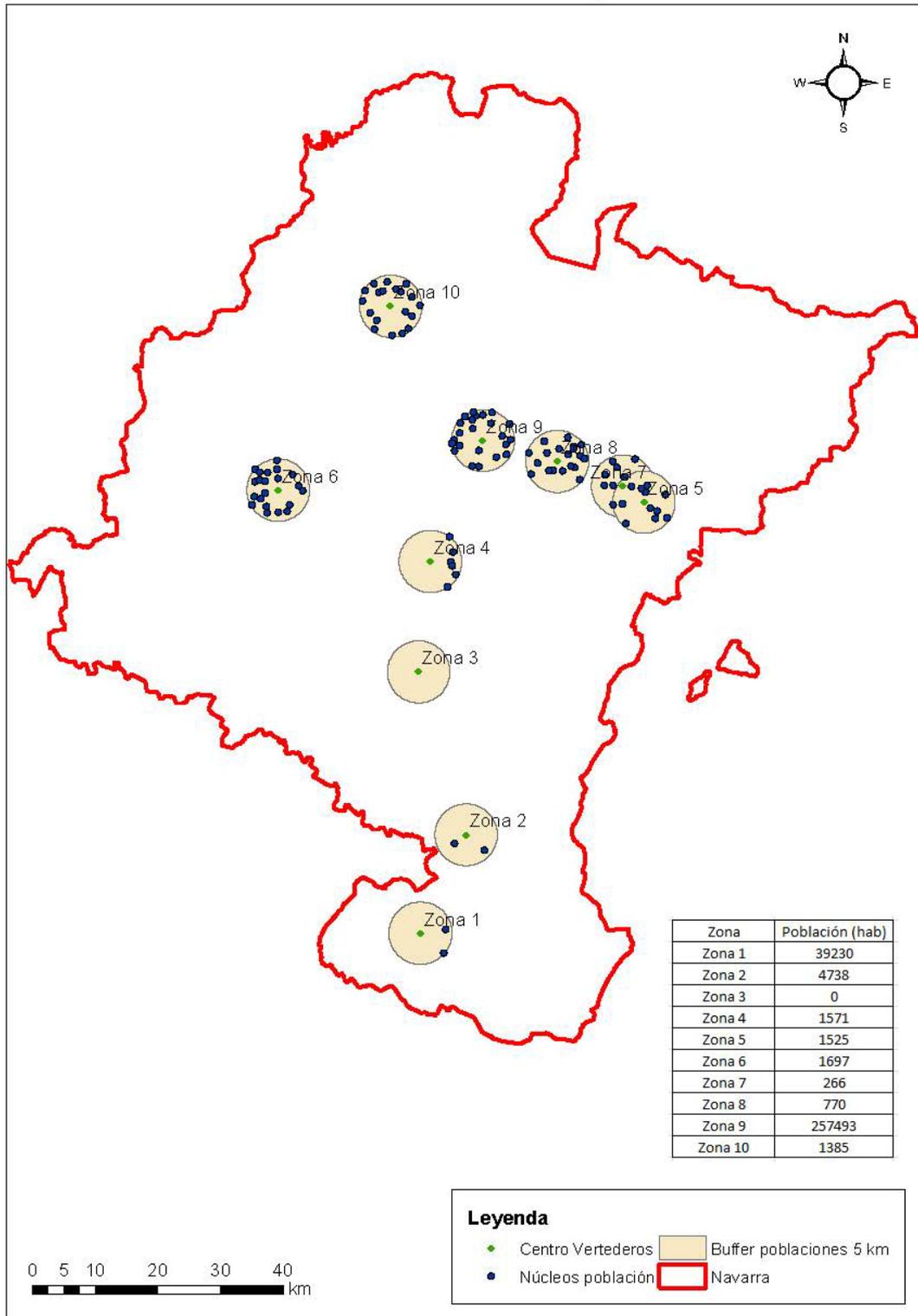


Ilustración 49: Cercanía a núcleos de población

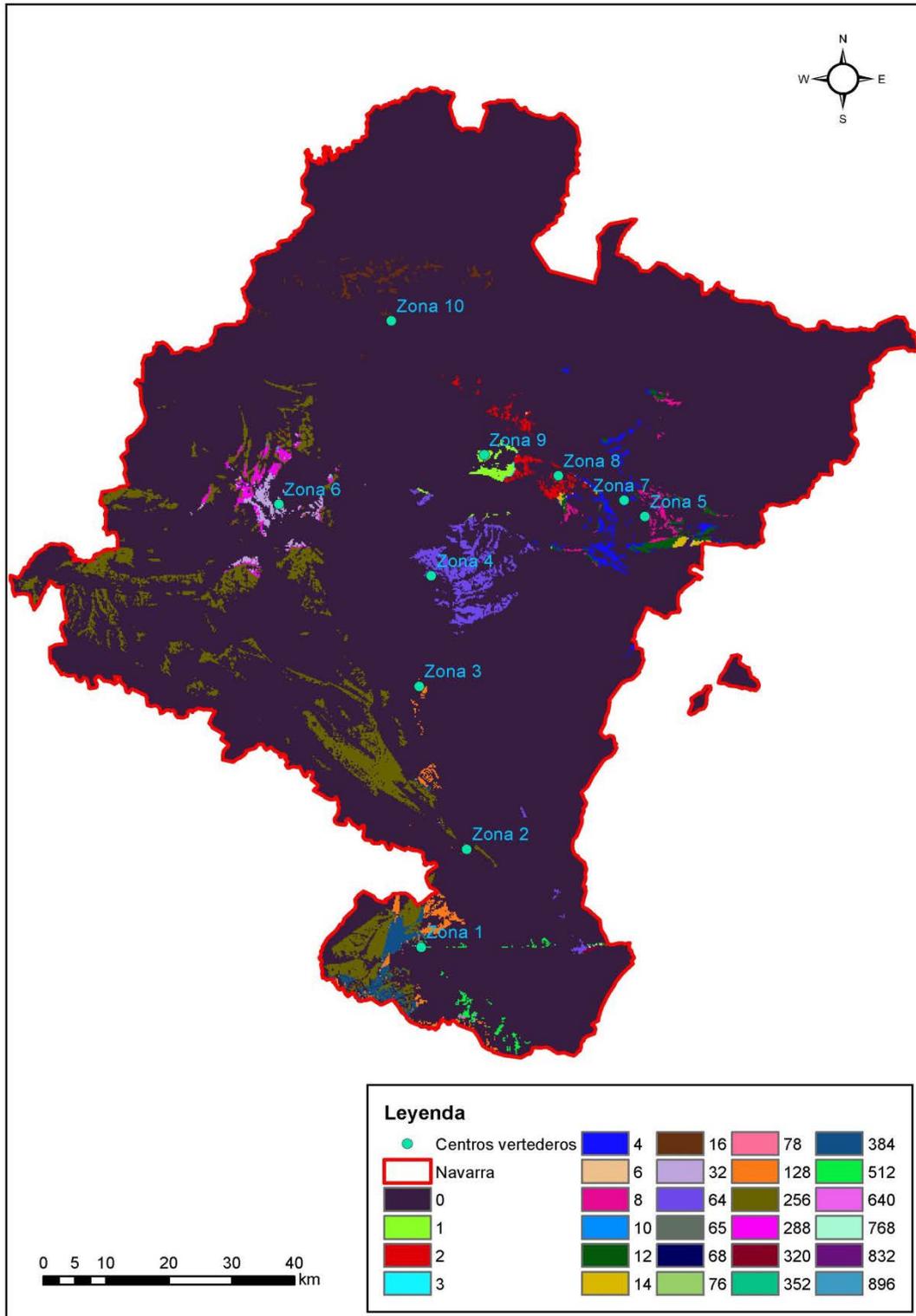


Ilustración 50: Visibilidad vertederos

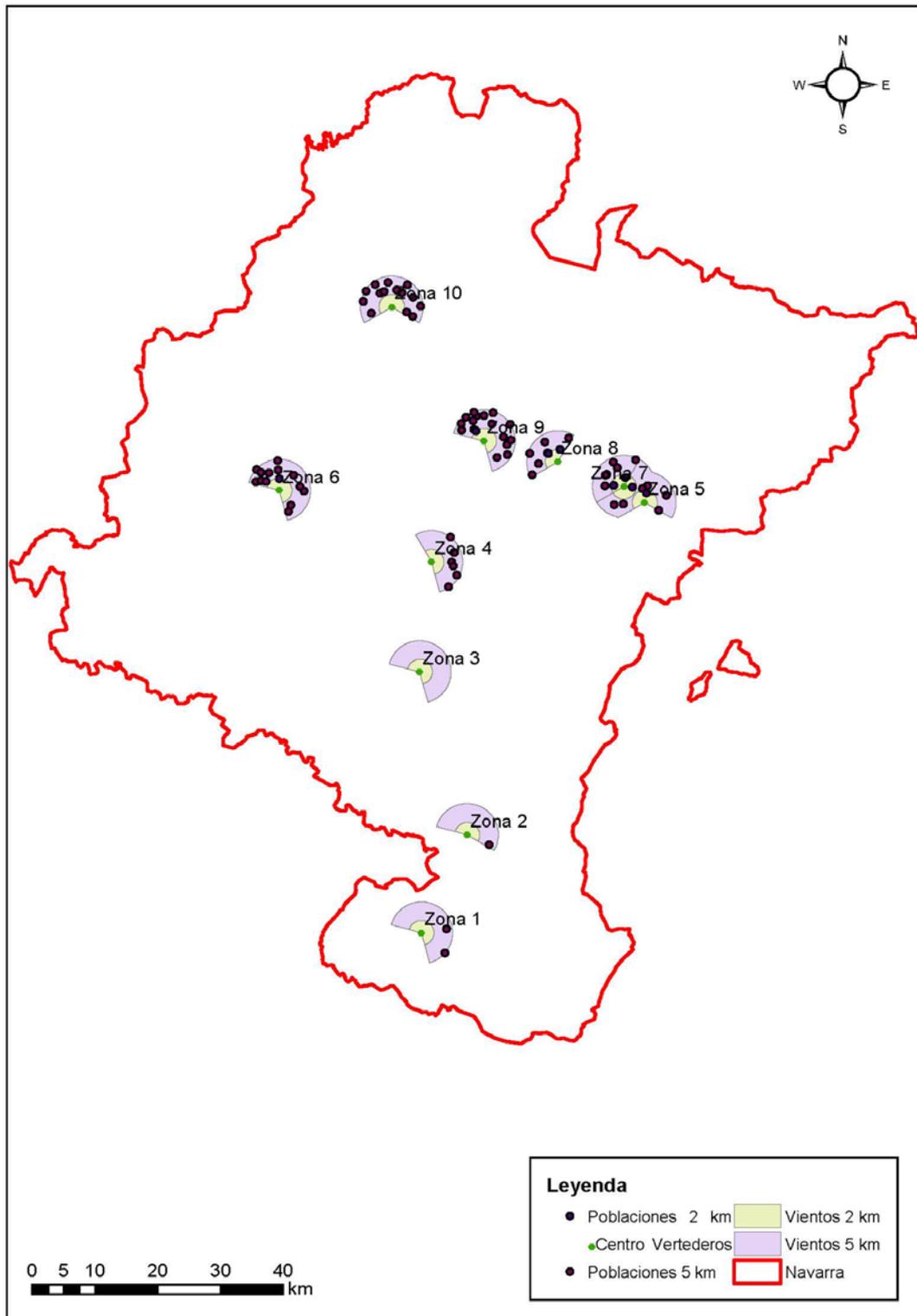


Ilustración 51: Vientos

### 4.3.1. Importancia de los criterios

Antes de comenzar con el análisis de las alternativas en base a los resultados definidos por los criterios y subcriterio, es necesario realizar la ponderación de los mismos. Para la ponderación de los tres criterios principales se han propuesto cuatro escenarios: equilibrado, preponderancia económica, preponderancia ambiental y preponderancia social (ver subapartado 3.3.4.1). Los pesos de los criterios para cada uno de los escenarios se recogen en la [Tabla 18](#).

**Tabla 18:** Peso de los criterios por escenarios

Escenario	Criterio		
	Económico (W)	Ambiental (W)	Social (W)
<b>Equilibrado</b>	0,33	0,33	0,33
<b>Prep. Económica</b>	0,60	0,20	0,20
<b>Prep. Ambiental</b>	0,20	0,60	0,20
<b>Prep. social</b>	0,20	0,20	0,60

Para conseguir el peso de los subcriterios, se ha seguido el Proceso Analítico Jerárquico (ver subapartado 3.3.4.2). En la [Tabla 19](#), [Tabla 20](#) y [Tabla 21](#) aparecen recogidas las matrices de comparación de Saaty (ver [Tabla 18](#)) para cada criterio (económico, ambiental y social), mientras que en la [Tabla 22](#) se representan los pesos de los subcriterios una vez aplicado el Proceso Analítico Jerárquico.

En términos económicos, el subcriterio de costes de transporte se considera mucho más importante con respecto a los otros tres subcriterios de este grupo, a los que se otorga una importancia similar entre sí. Esto se debe a que este subcriterio es el coste más importante que se producirá en el vertedero, ya que la necesidad de transportar los residuos para poder depositarlos se prolonga durante toda la vida útil del mismo. En cambio, los subcriterios de expropiaciones, material de cobertura y costes de funcionamiento de la instalación (temperatura) tendrán una menor importancia relativa ya que son costes de carácter más puntual y, por tanto, de menor envergadura.

Respecto al criterio ambiental, los subcriterios de emisiones atmosféricas y generación de lixiviados se consideran más importantes que los subcriterios de vulnerabilidad de los acuíferos y proximidad a la Red Natura. De nuevo, esto se debe a que el transporte de residuos provocará emisiones a la atmósfera durante toda la vida útil del vertedero. El subcriterio de generación de lixiviados se considera igualmente importante que el de emisiones, ya que la generación de lixiviados puede provocar graves problemas ambientales en caso de vertido de los mismos. A los dos subcriterios restantes se les otorga igual importancia entre sí y menor relevancia que las emisiones atmosféricas y la generación de lixiviados, respectivamente, ya que provocan menores afecciones sobre el medio ambiente.

Dentro del criterio social, todos los subcriterios se consideran igualmente importantes, puesto que todos contribuyen a provocar afecciones de distinta índole en el bienestar

de los habitantes de la zona cuya importancia relativa es difícilmente ponderable, ya que son completamente subjetivos y personales.

**Tabla 19:** Matriz de comparación criterio económico

	S.Cx1.1	S.Cx1.2	S.Cx1.3	S.Cx1.4
S.Cx1.1	1	1	0,2	1
S.Cx1.2	1	1	0,2	1
S.Cx1.3	5	5	1	5
S.Cx1.4	1	1	0,2	1

**Tabla 20:** Matriz de comparación criterio ambiental

	S.Cx1.1	S.Cx1.2	S.Cx1.3	S.Cx1.4
S.Cx1.1	1	1	0,2	1
S.Cx1.2	1	1	0,2	1
S.Cx1.3	5	5	1	5
S.Cx1.4	1	1	0,2	1

**Tabla 21:** Matriz de comparación criterio social

	S.Cx3.1	S.Cx3.2	S.Cx3.3
S.Cx3.1	1	1	1
S.Cx3.2	1	1	1
S.Cx3.3	1	1	1

**Tabla 22:** Peso de los subcriterios

C1				C2				C3		
$w_{sc11}$	$w_{sc12}$	$w_{sc13}$	$w_{sc14}$	$w_{sc21}$	$w_{sc22}$	$w_{sc23}$	$w_{sc24}$	$w_{sc31}$	$w_{sc32}$	$w_{sc33}$
0,125	0,125	0,625	0,125	0,375	0,125	0,125	0,375	0,333	0,333	0,333

### 4.3.2. Matriz de decisión

Tras analizar los resultados derivados del cálculo de los subcriterios con los SIG y calculados los pesos de los subcriterios, se procede al análisis de éstos, mediante la metodología multicriterio expuesta en el subapartado 3.3.4. Para ello, en primer lugar se construye la matriz de decisión tal y como se muestra en la [Tabla 23](#).

**Tabla 23:** Matriz de decisión

Zona	Económico				Ambiental				Social		
	S.C.1.1 V*sup	S.C.1.2. V*sup	S.C.1.3. (km)	S.C.1.4. (°C)	S.C.2.1. (km)	S.C.2.2 V*sup	S.C.2.3. (km)	S.C.2.4. (mm)	S.C.3.1. (hab)	S.C.3.2. (píxeles)	S.C.3.3. V*hab
<b>Z1</b>	50916	288889	97,1	6,33	97,1	133284	0,8	380,6	39230	358	33831
<b>Z2</b>	97328	328840	80	6,22	80	133284	1,7	383,1	4738	11171	1878
<b>Z3</b>	23778	259334	50	6,27	50	266562	6,6	470,7	0	1981	0
<b>Z4</b>	44026,8	100061	31	6,04	31	133284	6,2	622,2	1571	2072	1243
<b>Z5</b>	46889	53361	51	5,19	51	191737	0,7	840,7	1525	1226	72
<b>Z6</b>	44060	80309	49,5	5,77	49,5	133284	6,4	758,5	1697	1256	926
<b>Z7</b>	49529	91750	42,4	5,12	42,4	176408	0,5	864,2	266	1806	111
<b>Z8</b>	45331	94031	31,4	5,39	31,4	216418	1,5	877,1	770	842	409
<b>Z9</b>	79195	46189	4,3	5,63	4,3	266562	8,9	775,6	257493	424	227136
<b>Z10</b>	21962	137534	39,5	6,42	39,5	133284	2,5	1370,4	1385	527	920

Como se puede apreciar en la [Tabla 23](#), la alternativa Z9 es la mejor colocada según el subcriterio económico de expropiaciones. Sin embargo, esta misma zona es la peor en términos de calidad del material de cobertura (S.C. 1.2). En cuanto al subcriterio de costes de transporte (S.C. 1.3), la alternativa Z9 constituye la solución de menor coste, ya que es la más próxima a la zona de generación de los residuos. En contraposición, las alternativas Z1 y Z2 son las más alejadas del punto de generación y las que, por tanto, tendrán un coste mayor. Finalmente, la alternativa Z7 tendría los mayores costes de funcionamiento por encontrarse en la zona con temperaturas más bajas (S.C. 1.4).

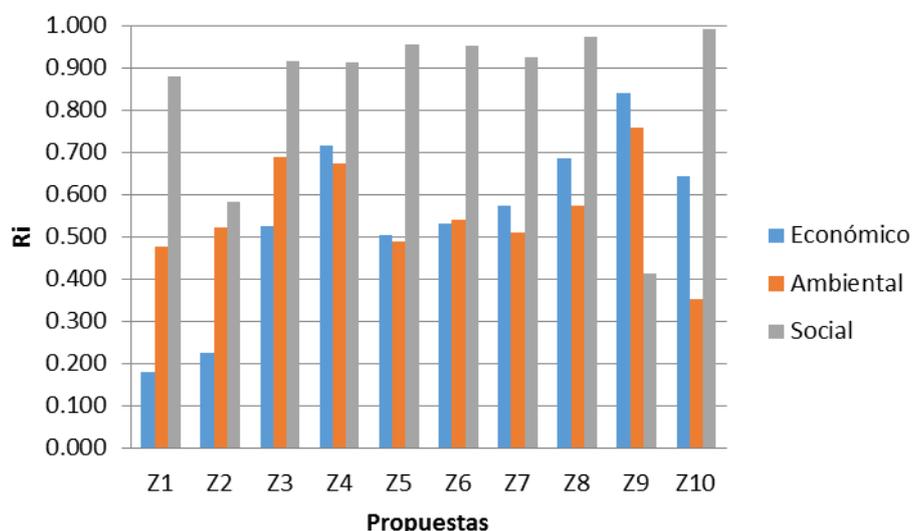
Las alternativas más alejadas del punto de generación (Z1 y Z2) son también las que mayores emisiones atmosféricas producen (S.C. 2.1), por lo que tampoco son deseables desde el punto de vista ambiental. Estas mismas alternativas constituyen a su vez las alternativas más favorables según el subcriterio de generación de lixiviados, ya que son las zonas con menor número de precipitaciones. En cuanto a los subcriterios de vulnerabilidad de los acuíferos (S.C. 2.2) y distancia a la Red Natura (S.C. 2.3), la alternativa Z9 destaca sobre el resto por guardar distancias mayores en relación a estas zonas vulnerables.

En los subcriterios sociales, la alternativa Z3 es la mejor respecto a los subcriterios de cercanía a núcleos de población (S.C. 3.1) y de vientos (S.C. 3.3.), siendo como tal la que afecta a menor número de población. En el lado contrario, se sitúa la alternativa Z9, ya que es la que más cercana al núcleo principal de población (Pamplona). Con respecto al subcriterio de visibilidad de vertederos (S.C. 3.2), la peor alternativa es la Z2, puesto que el vertedero es visible desde un mayor número de puntos.

Muchos de los subcriterios señalados para cada una de las alternativas tienen valores contrapuestos, por lo que se hace necesario el empleo de herramientas multicriterio capaces de considerar la dualidad y variedad de unidades de cada subcriterio con su respectiva valoración (positiva o negativa). Antes del análisis de los resultados globales, se recogen los resultados parciales en relación a cada uno de los criterios.

### 4.3.2.1. Resultados parciales

Antes de analizar los resultados globales que se desprenden del estudio y del análisis multicriterio, se muestran a continuación los resultados parciales de analizar cada criterio individualmente (ver [Ilustración 52](#)).



**Ilustración 52:** Valores parciales de Ri de las propuestas

En estos resultados se pueden apreciar claramente las diferencias entre las valoraciones alcanzadas por las propuestas en relación a cada criterio. Se observa una clara ventaja económica de la propuesta Z9 sobre las demás, debido a su cercanía a los mayores núcleos de población y, por ende, sus bajos costes de transporte. Por razones opuestas, la peor propuesta desde un punto de vista económico es la Z1. Z9 también es la mejor propuesta en términos ambientales, gracias a las bajas emisiones generadas y a su mayor distancia a los espacios incluidos en la Red Natura. Por último, la mejor alternativa desde el punto de vista social es la Z10, con un valor de Ri próximo a la unidad. En cambio, la que peor puntuación obtiene en este criterio es Z9, que sin embargo obtenía altos valores de Ri en los criterios económicos y ambientales. Esto es debido a su proximidad con la ciudad de Pamplona y otros municipios importantes, lo que provoca que la población afectada en esta propuesta sea muy grande.

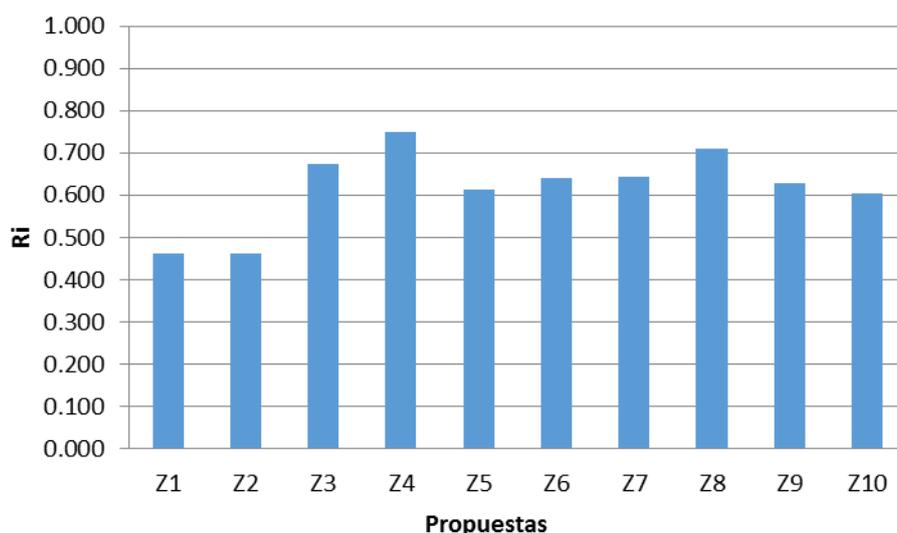
### 4.3.3. Resultados globales

Después de analizar los valores de los resultados de cada criterio, se aplica el método TOPSIS para obtener un ranking de preferencia de las zonas adecuadas identificadas en el subapartado 4.2 de acuerdo a su desempeño económico, ambiental y social. Definida la matriz de decisión, se pondera según la ecuación (5) y se normaliza según (6). Tras calcular la solución ideal positiva y negativa (ver ecuaciones (7) y (8)), se determina la distancia de cada propuesta a éstas soluciones (ver ecuaciones (9) y (10)) para finalmente obtener Ri según la ecuación (11) y realizar el ranking de

propuestas. En los siguientes subapartados aparecen los resultados obtenidos para cada escenario planteado.

#### 4.3.3.1. Escenario equilibrado

De acuerdo al primer escenario de ponderación considerado, se otorga la misma importancia a los criterios económicos, ambientales y sociales (ver [Tabla 18](#)). Los resultados obtenidos bajo estas circunstancias se representan en la [Ilustración 53](#).



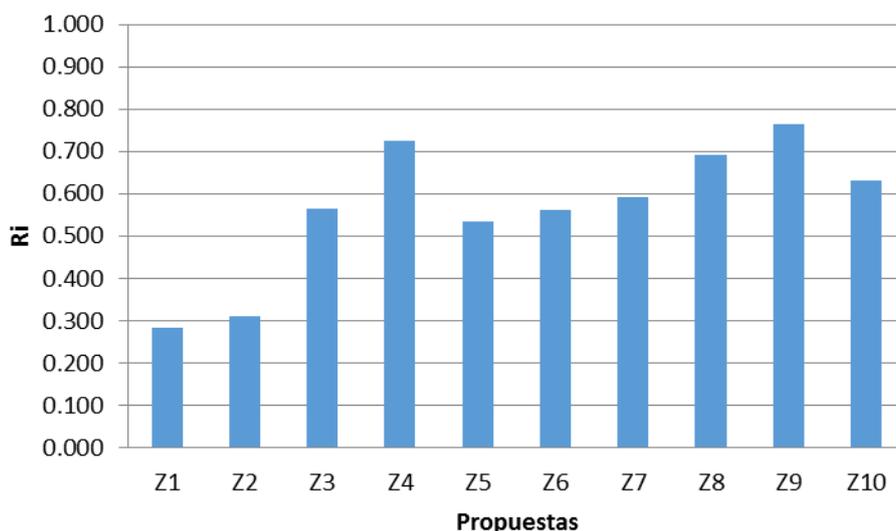
**Ilustración 53:** Valores globales de Ri de las 10 propuestas; Escenario 1

Como ya se señaló en el subapartado [3.3.4.3](#), una propuesta es mejor cuanto mayor sea su Ri, ya que está a la distancia más corta de la solución ideal positiva. Se aprecia que las propuestas Z1 y Z2, que son las zonas más alejadas del punto de generación de residuos, son las peores en este escenario. La importancia del subcriterio de costes de transporte es muy grande dentro del criterio económico y también tiene un peso importante el subcriterio de emisiones dentro del criterio ambiental. Estos dos subcriterios crecen proporcionalmente a las distancias de transporte, con lo que estas dos zonas tienen una mala valoración con respecto a ambos. Además, estas zonas están próximas a puntos de la Red Natura y presentan una vulnerabilidad media de los acuíferos. En cuanto al criterio social, también están entre las alternativas con mayor cantidad de población afectada.

La mejor solución para este escenario es la propuesta Z4, seguida por la Z8. Se trata de dos de las zonas más cercanas al punto de generación de los residuos y que, en general, tienen altas valoraciones en la mayoría de los subcriterios. Esto las convierte en soluciones más equilibradas y, por tanto, capaces de ofrecer una respuesta adecuada a todos los niveles (económico, ambiental y social).

#### 4.3.3.2. *Preponderancia del criterio económico*

En este segundo escenario, se le ha dado un peso del 60% al criterio económico y 20% a los criterios ambiental y social (ver [Tabla 18](#)). Los resultados asociados a este escenario se representan en la [Ilustración 54](#).



**Ilustración 54:** Valores globales de Ri de las propuestas; Escenario 2

En este escenario se presenta una gran variabilidad entre las propuestas, ya que los costes de transporte (subcriterio con mayor peso entre los económicos) convierten a las alternativas Z1 y Z2 en las menos adecuadas, obteniendo valores muy bajos de Ri.

Las alternativas Z9 y Z4 representan las mejores soluciones, puesto que corresponden a las zonas más cercanas al punto de generación de los residuos y a su vez presentan valoraciones dentro de la media para los otros tres subcriterios económicos. Las malas puntuaciones de Z9 en los subcriterios sociales son compensadas con el escaso peso de este criterio (20%) en relación al resto. Es por ello que, aun teniendo la alternativa Z4 mejores puntuaciones en relación al criterio social, la preponderancia económica concede ventaja a la propuesta Z9.

#### 4.3.3.3. *Preponderancia del criterio ambiental*

En este tercer escenario, el criterio ambiental tiene un peso del 60% (los subcriterios del mismo tendrán gran importancia en las puntuaciones de las propuestas) y el 40 % restante se divide igualmente entre el criterio económico y el social (ver [Tabla 18](#)). En la [Ilustración 55](#) se pueden ver los resultados obtenidos para este escenario.

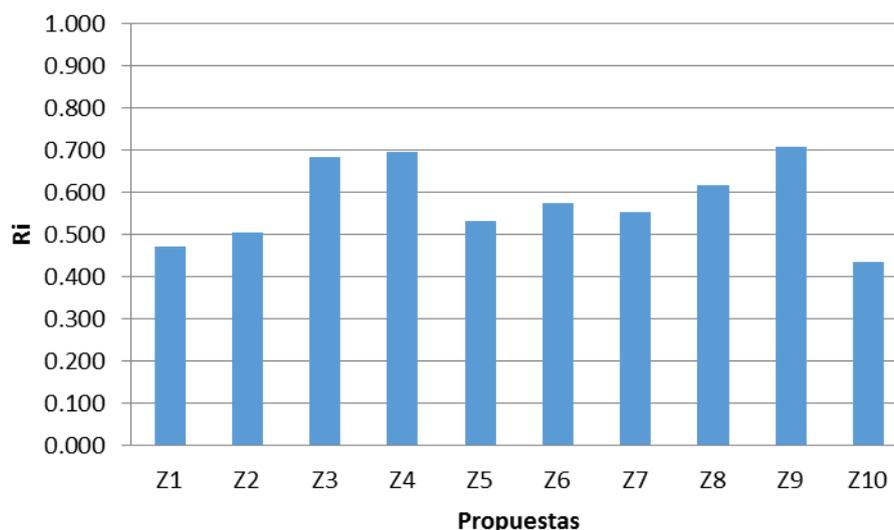


Ilustración 55: Valores globales de Ri de las propuestas; Escenario 3

En esta ocasión, como en el caso anterior, los mejores resultados se obtienen para las propuestas Z9 y Z4, seguidas muy de cerca por Z3. Las dos primeras son las zonas más cercanas al punto de generación de los residuos, con lo que obtienen las mejores puntuaciones respecto al subcriterio de emisiones atmosféricas, contando a su vez con buenas puntuaciones en el subcriterio de proximidad a la Red Natura y obteniendo valores aceptables en cuanto a generación de lixiviados y vulnerabilidad de los acuíferos. Se trata, por tanto, de zonas que combinan la proximidad al centro productor de residuos, distancias considerables a espacios protegidos que disminuyen la afección de los vertederos en dichas zonas, características litológicas medianamente buenas en cuanto a la vulnerabilidad de los acuíferos y valores de precipitaciones dentro de la media, lo que limita su influencia en la generación de lixiviados.

Los peores valores de Ri se obtienen para las propuestas Z10 y Z1. En el caso de la alternativa Z10, esto se debe sobre todo a que es la zona con mayor precipitación (generación de lixiviados) y a que se trata de una zona de vulnerabilidad media con respecto a la contaminación de los acuíferos. Estas dos características se unen a unas puntuaciones medias en los otros dos subcriterios ambientales (emisiones y proximidad a la Red Natura), configurándola como la opción más desfavorable. En el caso de la propuesta Z1, influye de manera muy importante en su valor Ri la distancia al punto de generación de los residuos (es la zona más alejada) y su cercanía a la Red Natura y la vulnerabilidad media de contaminación de los acuíferos.

#### 4.3.3.4. *Preponderancia del criterio social*

Finalmente, se plantea un cuarto escenario en el que el criterio social tiene un peso del 60% y los criterios económico y ambiental un peso del 20% (ver [Tabla 18](#)). En la [Ilustración 56](#) se muestran los resultados correspondientes a dicha combinación de pesos.

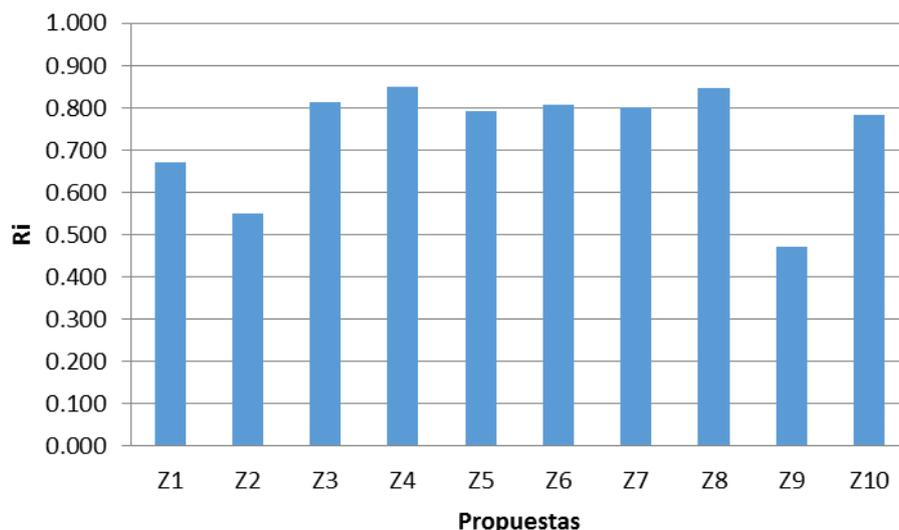


Ilustración 56: Valores globales de Ri de las propuestas; Escenario 4

En este escenario se obtienen los índices más altos de Ri y hay varias propuestas que obtienen valores muy similares. Como se puede observar, la propuesta Z9 es la que resulta en un valor menor de Ri, ya que, debido a su proximidad a la ciudad de Pamplona, afecta a mucha más población que el resto de propuestas. La mejor solución es la Z4, seguida de cerca por las alternativas Z8 y la Z3. La propuesta Z3 tiene mejores puntuaciones en los subcriterios sociales que la Z4, pero ésta presenta una puntuación más homogénea en la mayoría de subcriterios económicos, sociales y ambientales y, por ello, obtiene un valor de Ri mayor.

#### 4.3.4. Resumen de resultados

En este subapartado se recoge un resumen de los resultados obtenidos para los 4 escenarios, con el objetivo de facilitar la toma de decisión final. En la [Tabla 24](#) aparecen los escenarios estudiados y la posición de cada una de las propuestas para cada escenario.

Tabla 24: Resumen del ranking de las alternativas según escenario

Escenario	Ranking									
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10
Equilibrado	9	10	3	1	7	5	4	2	6	8
Prep. económica	10	9	6	2	8	7	5	3	1	4
Prep. ambiental	9	8	3	2	7	5	6	4	1	10
Prep. social	8	9	3	1	6	4	5	2	10	7

Haciendo una valoración general de las puntuaciones alcanzadas por las alternativas en los 4 escenarios estudiados, se podría concluir que la propuesta Z4 es la mejor zona para ubicación de las instalaciones de vertido, ya que obtiene buenas puntuaciones en relación a todos los criterios. Además, repite dos veces como mejor alternativa en los escenarios 1 y 4, quedando segunda en los escenarios 2 y 3. A pesar de ello, la mejor alternativa alcanza valores de Ri que están lejos del límite superior correspondiente a la solución ideal. Esto pone de manifiesto que varios de los

factores considerados para la ubicación del vertedero están en conflicto, con lo que es necesario aplicar metodologías como la propuesta para obtener conclusiones globales y poder introducir mejoras en aspectos concretos.

Si se estudia la variabilidad de Ri según el escenario, se puede observar que los intervalos de valores de Ri en el escenario 2 (ver [Ilustración 55](#)) y en el escenario 4 (ver [Ilustración 57](#)) son mayores que para los escenarios 1 (ver [Ilustración 54](#)) y escenario 3 (ver [Ilustración 56](#)). Esto se traduce en que los costes económicos y las afecciones sociales son más decisivos a la hora de determinar la valoración alcanzada por las propuestas. En cambio, en los otros dos escenarios, especialmente en el escenario 3 (preponderancia ambiental), las puntuaciones finales varían ligeramente entre las alternativas.

De estos datos se puede extraer que se pueden plantear mejoras sobre los subcriterios económicos para mejorar los valores de Ri de alguna de sus propuestas, sobre todo en relación a los costes de transporte, que es el factor de mayor peso dentro del criterio económico. Para disminuir los costes de transporte y a su vez las emisiones atmosféricas durante el mismo (subcriterio ambiental), se podría optar por medios de transporte más respetuosos con el medio ambiente como vehículos eléctricos.

Hay que señalar que las puntuaciones del criterio social son fácilmente modificables con respecto a las de los criterios económico y ambiental. El subcriterio de cercanía a núcleos de población, que tiene en cuenta el rechazo de la población ante la instalación próxima de un vertedero, puede mejorarse llevando a cabo campañas de concienciación y sensibilización. La afección provocada por el subcriterio de olores también puede paliarse mediante barreras osmogénicas u otras soluciones similares que disminuyen la presencia de olores.

Por todo esto y de acuerdo a la situación actual de la zona, la propuesta Z4 sería la elegida como localización para la ubicación del nuevo vertedero (ver [Tabla 24](#)). En caso de desarrollarse medidas para evitar las afecciones sociales, mejorándose con ello las bajas puntuaciones de Z9 en este criterio, se podría plantear esta opción como ubicación alternativa, ya que es la que minimiza los costes económicos de la instalación.



## **5. CONCLUSIONES**

En el presente estudio se ha planteado el uso de una herramienta de análisis espacial multicriterio para optimizar la ubicación de vertederos de residuos municipales. Se ha aunado en el mismo el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) con una metodología de análisis multicriterio para obtener la ubicación óptima del vertedero. La metodología planteada contribuye eficazmente a la reducción del trabajo y el tiempo necesario para llevar a cabo el estudio sin afectar la posibilidad de integrar en el mismo indicativos de diversa índole (económicos, ambientales y sociales) que dotan al análisis de mayor rigor, conjugando la rapidez de los SIG con la posibilidad de evaluación de distintos criterios que proporcionan los métodos de análisis multicriterio utilizados. La validez de los procedimientos usados queda contrastada mediante su aplicación al presente estudio.

Para el caso de estudio desarrollado, localizado en la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona, los factores relativos a la vulnerabilidad de los acuíferos y áreas inestables, generaron grandes superficies no adecuadas para la ubicación del vertedero, siendo éstos por tanto los factores más restrictivos en la fase inicial de exclusión de zonas. De los resultados del análisis multicriterio se determina que las mejores propuestas son aquellas que minimizan las distancias al punto de generación de residuos. En particular, los mejores resultados para estas zonas se evidencian cuando se da mayor peso al criterio económico. De forma similar, cuando la preponderancia del criterio ambiental es mayor, los mejores resultados se obtienen también para las zonas que minimizan la distancia al punto de generación. En este caso también se obtienen buenos resultados para las zonas con menor número de precipitaciones, ya que se genera menor volumen de lixiviados y, por tanto, se reducen las consecuencias provocadas por un vertido fortuito de los mismos. Por último, en la situación en que la preponderancia del criterio social es mayor, los mejores resultados se obtienen en aquellas zonas alejadas de núcleos de población importantes, ya que se disminuyen las afecciones que los vertederos causan sobre la población cercana.

Aunque se han obtenido soluciones notables desde el punto de vista de la sostenibilidad, se ha detectado que los factores económicos y sociales son los más influyentes en el proceso de toma de decisiones. La implementación de medidas como el uso de vehículos eléctricos, la utilización de barreras osmogénicas y la realización de campañas de concienciación a la población son las vías para conseguir alternativas aún más idóneas con impactos económicos, ambientales y sociales mínimos.

Finalmente, como línea de investigación futura se podría plantear el desarrollo de una aplicación o software basado en la metodología creada que automatice el proceso, proporcionando así una herramienta fácil de manejar que pudiese ser aplicada por usuarios no expertos en los conceptos teóricos en que se fundamenta. Asimismo, cabe señalar que esta metodología facilita la resolución de problemas complejos como el aquí tratado de una manera sencilla y rápida, con lo que su uso dentro del ámbito de la ingeniería ambiental, se podría extender al estudio de ubicación de otras instalaciones de tratamiento de residuos (plantas de reciclaje, incineración, etc.), adaptando la metodología a sus circunstancias y condicionantes específicos.

## **REFERENCIAS**

- [1] MAGRAMA, «RD 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero,» 2013.
- [2] P. Europeo y C. Europeo, «Directiva 2008/98/CE sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas,» 2008.
- [3] MAGRAMA, «Ley de Residuos y Suelos Contaminados,» 2011.
- [4] MAGRAMA, «Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos,» 1998.
- [5] M. del Pozo Manrique, «Selección de emplazamientos para vertederos controlados».
- [6] EPCC, *Sistemas de Información Geográfica aplicados a la ingeniería civil*, 2013.
- [7] V. Olaya, *Sistemas de Información Geográfica*, 2011.
- [8] J. Jensen y E. Christensen, «Solid and hazardous waste disposal site selection using digital geographic information system techniques,» *The Science of the Total Environment*, 1986.
- [9] J. Bosque Sendra, M. Gómez Delgado, V. Rodríguez Espinosa y M. Á. Díaz Muñoz, «Localización de centros de tratamiento de residuos: una propuesta metodológica basada en un SIG,» 1999.
- [10] «Portal de la Dirección General del Catastro,» [En línea]. Available: <http://www.catastro.meh.es/>.
- [11] M. A. y. A. L. Departamento de Desarrollo Rural, «Plan Integrado de Gestión de Residuos de Navarra 2010-2020».
- [12] M. A. y. A. L. Departamento de Desarrollo Rural, «Programa de prevención y Plan de Gestión del Plan de Residuos de Navarra 2017-2027,» 2016.
- [13] MAGRAMA, «Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos,» 2015.
- [14] S. G. d. C. Ambiental, «Desarrollo Técnico del R.D. 1481/2001 relativo a las instalaciones de vertido de residuos,» 2003.
- [15] MAGRAMA, «Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas,» 2013.
- [16] M. d. Fomento, «Ley 3/1995, de 23 de marzo, de Vías Pecuarias».
- [17] M. d. Fomento, «Norma de Construcción Sismorresistente,» 2009.
- [18] MAGRAMA, «Ley 4/1989, de 27 de marzo, de Conservación de los Espacios Naturales y de la Flora y Fauna Silvestres».
- [19] A. f. Desktop, «Environmental Systems Research Institute (ESRI),» ESRI: Redlands, CA, USA, 2013.

- [20] «Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra,» [En línea]. Available:  
<http://idena.navarra.es/Portal/Inicio>.
- [21] «ArcGIS,» [En línea]. Available: <http://doc.arcgis.com/es/arcgis-online/>. [Último acceso: 2016].
- [22] « Instituto Geográfico Nacional,» [En línea]. Available:  
<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>.
- [23] «Instituto Geológico y Minero de España (IGME),» [En línea]. Available:  
<http://mapas.igme.es/Servicios/default.aspx>.
- [24] Y. Fan, H. Li y G. Miguez-Macho, «Global Patterns of Groundwater Table Depth,» *Science*, pp. 940-943, 2013.
- [25] «MAGRAMA,» [En línea]. Available: <http://www.mapama.gob.es/es/>.
- [26] MAGRAMA, «Precios medios anuales de las tierras de uso agrario,» 2016.
- [27] T. y. C. (. d. N. Departamento de Obras Públicas, «Cartografía Geológica de Navarra 1:25000».
- [28] «<http://ec.europa.eu/>,» [En línea]. Available:  
<http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/eucostwaste.pdf>.
- [29] «<http://ec.europa.eu/>,» [En línea]. Available:  
[http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/climate\\_change.pdf](http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/climate_change.pdf).
- [30] «Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios,» [En línea]. Available:  
<http://sig.mapama.es/siga/>.
- [31] «Meteorología y climatología de Navarra,» [En línea]. Available:  
<http://meteo.navarra.es/energiasrenovables/maparosavientos.cfm>.
- [32] J. F. Cid Montañés, «Control ambiental y social de los olores en vertederos,» 2002.
- [33] T. Saaty, *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resources allocation*, M cGraw-Hill, 1980.
- [34] C. L. Hwang y K. Yoon, «Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications,» *New York: Springer-Verlag*, 1981.

