

Rutas adaptativas: aplicación de lógica difusa al análisis SIG de los valores naturales y culturales del entorno del cabo Trafalgar (Cádiz, España)

Adaptive paths: application of fuzzy logic in the GIS analysis of the natural and cultural values of the cape Trafalgar surroundings (Cádiz, Spain)

Alfredo Fernández-Enríquez

Alfredo.fernandez@uca.es  0000-0002-5468-0174

Manuel Arcila-Garrido

Manuel.arcila@uca.es  0000-0002-9724-3767

Gema Ramírez-Guerrero

Gema.ramirez@uca.es  0000-0001-8862-4392

Javier García-Onetti

Javier.onetti@uca.es  0000-0002-3798-8249

*Departamento de Historia, Geografía y Filosofía, Instituto para el Desarrollo Social Sostenible (INDESS),
Universidad de Cádiz. Avenida Doctor Gómez Ulla. Cádiz 11003, España.*

INFO ARTÍCULO

Recibido: 02-05-2025
Revisado: 07-07-2025
Aceptado: 26-09-2025

PALABRAS CLAVE

Espacios Naturales Protegidos
Lógica difusa
Patrimonio histórico-cultural
Ruta
Sistemas de Información
Geográfica

KEYWORDS

Protected Natural Areas
Fuzzy logic
Historic and cultural heritage
Route
Geographic Information
Systems

RESUMEN

Las herramientas SIG de lógica difusa permiten valorar el paisaje en su conjunto, más allá de la rígida conectividad propia del análisis de redes, para seleccionar rutas discriminando flexiblemente temáticas y niveles de esfuerzo o confort climático estacional deseados.

Este artículo propone un método de selección de rutas acordes a las preferencias temáticas de los usuarios utilizando indicadores cualitativos del carácter predominante de las rutas, naturalistas o culturales; y parámetros cuantitativos para seleccionar las pendientes y temperaturas medias estacionales deseadas.

Esta información reduce la incertidumbre de los usuarios y, con ella, la vulnerabilidad de territorios con componente turística. El análisis de los datos generados por los usuarios abre la posibilidad de implementar un SIG participativo susceptible de sustentar la construcción social del paisaje cultural.

ABSTRACT

The utilization of fuzzy logic GIS tools facilitates a comprehensive evaluation of the landscape, transcending the rigid connectivity inherent in network analysis and enabling the selection of routes through the flexible differentiation of themes and levels of effort, or desired seasonal climate comfort.

We propose a route selection method based on users' thematic preferences, using qualitative indicators of the route predominant nature (naturalistic or cultural) and quantitative parameters to select desired gradients and average seasonal temperatures.

This information serves to reduce both user uncertainty and the vulnerability of areas with tourism components. Furthermore, the analysis of user-generated data has the potential to facilitate the implementation of a participatory GIS, which could support the social construction of the cultural landscape.



1. INTRODUCCIÓN

1.1. Rutas turístico-culturales

La planificación de rutas adaptativas en entornos con alto valor patrimonial y natural constituye una herramienta estratégica para mejorar su experiencia de uso. En un contexto marcado por la necesidad de gestionar de forma sostenible los flujos turísticos y promover un desarrollo más equilibrado del espacio, el diseño de rutas mediante tecnologías como los SIG y la lógica difusa permite integrar variables físicas, climáticas y temáticas en la toma de decisiones. Desde esta perspectiva, las rutas cumplen una función recreativa o interpretativa, pero también se consolidan como instrumentos de valorización territorial, alineados con enfoques actuales del *marketing* turístico y del *marketing* territorial (Pafi *et al.* 2020), al reforzar la identidad local y facilitar la diferenciación competitiva de los destinos.

Desde este enfoque, el diseño de rutas turístico-culturales es un procedimiento de valorización del patrimonio y el turismo (ICOMOS, 2008). Entendiendo los itinerarios culturales como recursos culturales territoriales, de origen histórico, pueden considerarse productos turísticos de calidad (Arcila *et al.*, 2015), especialmente en territorios con alta densidad de hitos patrimoniales.

La proliferación de rutas e itinerarios culturales se relaciona especialmente con la mejora de la oferta turística. Entre las ventajas que proporcionan cabe citar: diversificación de la oferta; reducción de la estacionalidad de la demanda; atracción de usuarios de elevado perfil socio económico; el impulso de sectores sostenibles de la economía local por su bajo impacto ambiental; estímulo a la colaboración entre los ciudadanos y las instituciones; y mejora de la apreciación ciudadana del patrimonio (Calderón-Puerta & Arcila-Garrido, 2018).

La identificación de nuevas rutas y áreas turísticas de carácter cultural contribuye a disminuir la presión sobre destinos saturados. Por ejemplo, en la periferia de La Habana (Cuba), el municipio de San Miguel del Padrón alberga un valioso patrimonio cultural intangible, en riesgo de desaparecer, donde la Ruta Cultural Benny Moré contribuye a reforzar la interconexión del poblamiento y el escaso equipamiento cultural. Al hacer más equitativa la distribución de los servicios, se potencia la colaboración entre entidades para identificar, preservar y transmitir la herencia e identidad cultural y estimular el desarrollo sostenible aprovechando potencialidades endógenas (Suárez *et al.*, 2023).

De este modo es posible reducir la presión sobre ámbitos tensionados, como los urbanos, sin extender los perjuicios de la saturación turística al conjunto del territorio. Las ciudades apoyarse en localidades periféricas para actuar como puertas de territorios culturales más amplios y diversos (Capel, 2005).

En estos territorios extensos, los caminos históricos refuerzan los valores y rasgos autóctonos y la identidad de la población (López *et al.*, 2006). Estos caminos son marcos sociales de la memoria, y cuentan con valores de carácter patrimonial asociados al paisaje (Moreno-Veloza & Garzón-Martínez, 2019). El territorio, y más concretamente los caminos que permiten recorrerlo, se convierte a la vez en recurso y soporte de las rutas turísticos-culturales, que han de considerar dos indicadores comunes: el patrimonio y el territorio (Morère, 2012).

Un caso paradigmático son los antiguos trazados ferroviarios, de gran valor patrimonial y cultural, cuya reutilización turística ha sido propiciada en España desde 1993 por el Programa Vías Verdes. Se ha convertido en un instrumento para la promoción y potenciación de un turismo rural sostenible a través de la revalorización turística del patrimonio histórico-cultural que representa los trazados y las infraestructuras ferroviarias en desuso (Moral, 2016).

Las encuestas realizadas entre los usuarios de las vías verdes andaluzas de la Sierra (Cádiz-Sevilla), del Aceite (Córdoba-Jaén), de la Campiña (Córdoba-Sevilla) y de la Sierra Norte de Sevilla (Sevilla) han establecido que la afluencia depende en gran medida de la proximidad de núcleos de población; que casi 2/3 de los usuarios son caminantes, y el resto ciclistas, pero que entre los usuarios estrictamente turísticos, el porcentaje de ciclistas y peatones son equivalentes; y que en torno al 63% de los encuestados utiliza las vías verdes para ocio, recreación y turismo deportivo, siendo minoritario el uso estrictamente deportivo (Ventura *et al.*, 2023).



El turismo de proximidad y el turismo cultural son sectores especialmente resilientes como quedo acreditado durante la reactivación del turismo durante la pandemia y en el periodo posterior, cuando la programación de rutas culturales jugo un importante papel en la recuperación de la actividad turística (Fernández-Laso & López, 2022). Esta es una de las razones por las que el valor global de los itinerarios y rutas culturales es superior a la suma de sus distintos elementos, y esencial para su adecuada comprensión y valoración (López & Vidargas, 2011).

Extendiendo al territorio este enfoque podemos valorar el papel de las redes de caminos públicos al servicio de la construcción social del paisaje. Esta ha de ser fruto de su percepción y valoración por los ciudadanos, a los que es deseable dotar de medios para mejorar esa interpretación y, en consecuencia, la preservación del paisaje cultural en general y de los hitos patrimoniales en particular.

La valoración del capital natural y cultural ha de empezar de raíz, contando con los yacimientos arqueológicos como primeros vestigios de la antropización del paisaje. Su deterioro puede ser prevenido protegiendo estos yacimientos estricta e individualmente, pero su consideración conjunta a escala territorial ha de incluir el conjunto de componentes del paisaje donde se insertan. Estos paisajes arqueológicos pueden promoverse mediante itinerarios culturales, en los que hay que implicar a la población local para cualificar la trayectoria histórica de estos trayectos territoriales, cuyo contenido e identidad puede ser accesible por medios digitales para favorecer su divulgación y un acceso físico ordenado (Pérez & Maruri, 2024).

El punto de partida en la definición de estas rutas es la selección de los hitos que le dan sentido, integrando los distintos elementos existentes y vertebrando el espacio (Navalón, 2014). Una vez valorados, sus características han de ser desglosadas en datos concretos para ser introducidas en un Sistema de Información Geográfica. Los SIG cuentan con herramientas para elaborar, evaluar y divulgar diferentes alternativas para recorrer el territorio atendiendo a los diversos propósitos de los usuarios (Arcila *et al.*, 2015).

La selección de hitos susceptibles de vertebrar una ruta turística puede efectuarse compaginando métodos cuantitativos y cualitativos para agrupar atractivos turísticos por su temática y localización. Estas técnicas de agrupamiento permiten jerarquizar los clústeres turísticos y planificar las inversiones necesarias para su puesta en servicio (Duarte-Duarte *et al.*, 2021).

117

1.2. Herramientas SIG de diseño de rutas

Los SIG son una herramienta consolidada en el tratamiento de información sobre el patrimonio histórico y cultural. Son la herramienta más eficaz para generar propuestas de rutas turísticas, dada su capacidad de poner en relación las múltiples variables temáticas y espaciales recopiladas al efecto (Calderón-Puerta & Arcila-Garrido, 2020). Destaca su relevante papel en arqueología, tanto en adquisición de datos como en análisis espacial y reconstrucción del paisaje (Yao *et al.*, 2023). Permiten elaborar reconstrucciones virtuales de elementos arqueológicos, y también son idóneos para la difusión web de los resultados de la investigación a través de geoportales, con propósito divulgativo o como parte integrante de Infraestructuras de datos espaciales (IDEs) que permiten compartir información con la comunidad científica.

Por otra parte, el análisis espacial con diferentes técnicas SIG se aplica frecuentemente al entorno de los yacimientos arqueológicos para identificar patrones con propósitos descriptivos y predictivos con los que orientar la prospección arqueológica, aunque también es posible efectuar análisis espacial a escala *intra-site* y micro espacial (Zamora, 2017).

Merino-del Río *et al.*, (2020) efectúan una revisión sistemática de la bibliografía en web of science y scopus combinando las palabras clave "gis", "ruta" y "arqueología" para seleccionar 136 publicaciones, de las cuales los estudios de corte histórico presentan 94 entradas, y los estudios orientados al diseño y gestión de paisajes culturales cuentan con 42, dos de ellos sobre los paisajes culturales del bajo Guadalquivir. La utilidad predominante que prestan los SIG es incorporar al diseño del itinerario cultural los significados históricos y los servicios complementarios.

Entre sus muchas utilidades, los SIG facilitan la construcción de modelos matemáticos predictivos que deben ser validados por los usuarios, ya sean simples paseantes o expertos en diversos campos científicos,



quienes han de discutir y realimentar el análisis y la predicción para hacerlos más certeros. No obstante, es indiscutible la utilidad que pueden prestar en la preservación y socialización del patrimonio cultural, ambas indisociables, así como su contribución facilitando la implicación de la población, para incorporar actores y organizaciones locales que aporten saberes y memoria local sobre los que generar compromisos institucionales y promover redes de colaboración. Por ejemplo, en el caso del paisaje cultural marítimo existen múltiples amenazas que se realimentan entre sí: falta de información, difícil acceso al público, falta de conciencia cultural común, depredación, explotación económica, dragados, efectos negativos del cambio climático.... (Dourteau *et al.* 2021).

Para enlazar los hitos del recorrido, entre las herramientas SIG destaca el análisis de redes. De carácter flexible y dinámico, proporciona rutas eficientes atendiendo al mínimo coste de desplazamiento a recorrer entre los hitos especificados (ESRI, 2024). Las redes son conjuntos de nodos conectados por arcos que canalizan los flujos, ya sean de viajeros, caudales, energía o información. Resuelven el problema de elaborar rutas mediante cálculos simples que aportan soluciones eficientes atendiendo a diferentes criterios: el camino mínimo, con la menor longitud acumulada posible; el camino de coste mínimo, considerando la impedancia implícita a los nodos intermedios que haya que atravesar y/o la propia de los arcos recorridos; la adopción de restricciones de flujo máximo; la optimización del recorrido por varios nodos, volviendo al punto inicial... (Vila, 2029).

Puede obtenerse un análisis de redes desde un cliente ligero, efectuado por un servidor. Estos ofrecen opciones para personalizarlo estableciendo los parámetros deseados como lo hace google maps, que ofrece a los usuarios funcionalidades SIG de fácil implementación: por ejemplo, los itinerarios a la carta para recorrer los puntos de interés en Bucaramanga, Colombia (Corzo, 2020).

También en Tlemcen (Argelia) la superposición y comparación de las diversas propuestas de rutas culturales turísticas elaboradas con google maps permitió identificar y conservar las rutas más adecuadas. La implicación de la población local fue fundamental para ubicar y clasificar los puntos de interés, a lo que se ha de añadir y actualizar el inventario de eventos programados y la infraestructura turística (restauración y alojamiento). Además, sería posible integrar esta oferta urbana con la de zonas rurales desfavorecidas con un interesante potencial cultural. (Addoun *et al.*, 2023).

La accesibilidad de los bienes patrimoniales es un requisito previo para el desarrollo local de áreas rurales. La evaluación cuantitativa y cualitativa de esta accesibilidad es requisito previo en la planificación de la actividad turística. Los indicadores pueden ser territoriales o de gestión: los primeros derivan de la orografía, el hábitat rural, la conectividad con la red de carreteras y los centros regionales, la centralidad de los núcleos de población y los usos de suelo predominantes. Los indicadores de gestión de los bienes patrimoniales incluyen las figuras normativas de planificación y los de acceso a contenidos disponibles en la web (Del Espino *et al.*, 2022).

Junto a la accesibilidad puede ponderarse la fragilidad, de los bienes culturales en particular y del paisaje cultural en general, utilizando la sensibilidad ecológica, visual y cultural del entorno mediante estadísticas de correlación entre criterios para obtener mapas de sensibilidad, en lugar de los habituales métodos subjetivos. Así se obtienen indicadores objetivos para la conservación del patrimonio (Yang & Shen, 2023).

El diseño con herramientas SIG de rutas turísticas en Extremadura ha permitido constatar que hay dos vertientes predominantes en el turismo regional, el de carácter natural y el cultural, y que la distribución de este último no se corresponde con la de los recursos culturales del territorio. La dispersión del patrimonio cultural en el extenso medio rural extremeño dificulta la afluencia turística, que solo unos pocos lugares consiguen atraer. De ahí la necesidad de promover rutas que puedan crear sinergias entre distintos municipios para atraer visitantes, y la utilidad de las herramientas SIG, tanto para el análisis de redes para facilitar trayectos eficientes, como para analizar los recursos disponibles y discriminar diversas rutas acordes a las preferencias de los usuarios (Sánchez-Martín *et al.*, 2020).

Pero también es posible prescindir del rígido análisis de redes y utilizar otras herramientas SIG de carácter flexible, entra las que destacan las de lógica difusa por su capacidad para diseñar rutas optimizadas con múltiples objetivos que equilibran criterios conflictivos, como el costo, el tiempo y la fiabilidad de las rutas.



La lógica difusa, enunciada por Lotfi A. Zadeh en 1965, combina teoría de conjuntos y probabilidad para emular como el razonamiento humano utiliza verdades difusas, conjunciones difusas y reglas de deducción difusas (Zadeh, 1996). Para manejar conceptos de certidumbre parcial con valores matemáticos, Zadeh propugna la utilización de conjuntos difusos, donde los valores pueden oscilar entre 0 y 1, en situaciones donde la información es imprecisa o subjetiva. Actualmente se utilizan en sistemas de control, inteligencia artificial y procesamiento de lenguaje natural, entre otras aplicaciones.

Zhang *et al.* (2021) analizan 49 aplicaciones recientes de la lógica difusa desarrolladas para resolver diversos problemas de ingeniería de tráfico y transporte, desglosados en 25 categorías que comprenden desde la gestión de autopistas hasta la de bicicletas compartidas.

En cuanto a la aplicación de la lógica difusa al denominado turismo inteligente, es aún incipiente. Jewpanya *et al.* (2025) proponen modelos sostenibles para capturar y evaluar eficazmente las preferencias individuales de los turistas mediante el Proceso Analítico Jerárquico Difuso (*Fuzzy AHP*), proporcionando un entorno flexible para tomar decisiones acordes a las preferencias de los turistas. Por su parte, Chrysafiadi *et al.* (2025) combinan TOPSIS (Técnica de Ordenamiento por Similitud con la Solución Ideal) con lógica difusa para hacer recomendaciones personalizadas.

Estas aplicaciones son de utilidad para viajeros individuales o agencias de viajes, ofreciendo sugerencias de destinos adaptadas a sus demandas. Aunque el enfoque se centra en la selección de destinos, la metodología empleada es aplicable al diseño de rutas culturales, ya que permite ponderar múltiples criterios (por ejemplo, valor histórico, atractivo cultural, accesibilidad) y optimizar itinerarios adaptados a criterios subjetivos y la incertidumbre inherente a las preferencias turísticas.

1.3. Sistemas de Información Geográfica Participativos (SIGP)

Numerosos estudios utilizan SIGP mediante método cuantitativos, con encuestas presenciales o prospecciones en internet. En muchos casos los combinan con métodos cualitativos, mediante entrevistas, y los verifican contrastando los resultados con datos de campo.

El conocimiento espacial local, basado en una interacción física personal prolongada con el paisaje, enriquece su interpretación incorporando paisajes pasados, así como facilita su defensa y gestión incorporando a la población como sujetos activos en el registro e interpretación del patrimonio cultural. En este sentido, Larrain y McCall (2019) enfatizan la incorporación del conocimiento local en arqueología mediante Sistemas de Información Geográfica Participativa (SIGP); en Botsuana, Basupi *et al.* (2017) documentan como el conocimiento espacial local de las tierras de pastoreo comunales sustenta patrones de pastoreo y movilidad espacial, y como acusa los impactos de las subdivisiones y las políticas de privatización en los pastizales.

En el medio acuático, lacustre y marino, Azzurro y Cerri (2021) involucraron a pescadores locales para bosquejar la distribución de tres especies invasoras, aplicando al resultado un modelado bayesiano para cartografiar su distribución. Por su parte, Barnett *et al.* (2016) abordan la integración de datos espaciales, subjetivos y objetivos, recopilando experiencias de los pescadores en materia de desechos marinos y resaltando los procesos sociales y ambientales involucrados.

En una perspectiva más general, Brown *et al.* (2017) identifican valores marinos y costeros integrando métodos cualitativos, mediante entrevistas, y cuantitativos, mediante encuestas amplias, verificando la gran variabilidad de la validez espacial y su estrecha dependencia del valor posicional y la experiencia personal.

El medio urbano es objeto de especial interés para satisfacer las necesidades de los residentes, especialmente en materia de zonas verdes, pero no exclusivamente. Por ejemplo, incorporando paisajes sonoros, obtenidos mediante encuestas, para combinarlos con valores paisajísticos cartográficos y diseñar infraestructura verde urbana (Korpilo *et al.* 2023), o documentando y divulgando mediante audioguías el patrimonio medioambiental y etnográfico marítimo-pesquero (Fundación Biodiversidad, 2025).

Pero la planificación urbana debe considerar más allá del contexto urbano inmediato, pues la población necesita zonas verdes convencionales en la ciudad, pero cuando la abandonan eligen visitar espacios naturales distantes que ofrecen una mayor variedad de cualidades y posibilidades recreativas. (Bijker & Sijtsma, 2017).



El concepto de esparcimiento al aire libre se vincula tanto con las zonas verdes urbanas como con espacios con mayor o menor grado de naturalidad. La accesibilidad equitativa a los espacios verdes y a sus servicios ecosistémicos culturales debe combinar mediciones objetivas y subjetivas y relacionar la accesibilidad no sólo con la distancia, sino también con el nivel de ingresos y la posesión de un vehículo (Laatikainen, 2015).

Los valores culturales y antropogénicos que los residentes urbanos asignan a los espacios verdes formales e informales hacen necesario identificar y abordar los espacios verdes informales en la gobernanza de los espacios verdes urbanos y periurbanos (Pietrzyk-Kaszyńska *et al.*, 2017). Czembrowski *et al.* (2016) vinculan dos perspectivas diferentes de valor evaluando la percepción de los espacios verdes urbanos mediante participación pública, y contrastando dicha valoración con la tarificación hedónica de los espacios verdes: en los formales, la valoración es coherente con el impacto en los precios de la propiedad; en los informales se aprecian diferentes percepciones según el enfoque monetario y el no monetario.

En definitiva, se constata la necesidad de evaluar los valores sociales y culturales de suelos públicos, desde parques nacionales y reservas hasta vías pecuarias o tierras de uso múltiple. Generando métricas sociales del paisaje se muestran asociaciones estadísticamente significativas entre los valores y el tipo de tierra pública, la clasificación de área protegida de la UICN y el nivel de protección de la gestión (Brown *et al.* 2014). También hay asociación entre la distribución espacial de los servicios ecosistémicos y el bienestar subjetivo de los residentes en paisajes agroforestales (Fagerholm *et al.*, 2016).

Ramírez *et al.* (2023) identifican tres categorías de barreras (epistemológicas, tecnológicas y culturales) que limitan la participación pública en la planificación urbana mediante SIGP. Su interrelación hace necesario evaluar los avances en cada campo, pues el debilitamiento de cada una de estas barreras incide en las demás.

1.4. Objetivos

Ante la ausencia de publicaciones específicas sobre aplicación de lógica difusa y herramientas SIG al diseño de rutas de interés cultural y naturalista, constatada tras una exhaustiva búsqueda de fuentes, a continuación se desarrolla la metodología esbozada por Fernández-Enríquez *et al.* (2024) para diseñar rutas que, transitando por dominio público, permitan apreciar las características naturales o culturales del territorio adaptándose a las preferencias, condición física de los usuarios y temperatura media mensual.

El objetivo principal es proponer a los usuarios un método de selección de las rutas más acordes a sus intereses personales mediante indicadores temáticos, cualitativos, susceptibles de presentarse telemáticamente como alternativas a elegir en cualquier momento. Ya que los elementos de interés natural y cultural están mezclados en el territorio, el usuario debe seleccionar la preferencia que se aplicará como criterio predominante, aunque sin carácter excluyente.

Como objetivos secundarios se pueden añadir diversos parámetros cuantitativos para elegir rutas adecuadas a las circunstancias personales: por ejemplo, la pendiente de los caminos y el confort climático estacional. Las temperaturas extremas implican riesgos, de hipotermia invernal en zonas de montaña, o de golpes de calor estivales en gran parte de Andalucía. Estos últimos están en aumento con el calentamiento global, y son más probables con el esfuerzo físico necesario para superar las fuertes pendientes existentes en el ámbito de estudio. No considerar estas variables incrementa la incertidumbre de los usuarios y, con ella, la vulnerabilidad de territorios con componente turística.

Asimismo, la posibilidad de generar experiencias turísticas personalizadas permite optimizar la gestión del flujo de visitantes, pero también reforzar la identidad territorial y la competitividad de destinos menos consolidados. Este tipo de soluciones, apoyadas en Sistemas de Información Geográfica Participativos y técnicas de computación blanda (*soft computing*), contribuyen a construir narrativas territoriales coherentes con la sostenibilidad, la inclusión y la innovación turística (Dimitrovski *et al.*, 2021). En este sentido, la propuesta metodológica se alinea con estrategias propias del *marketing* territorial al facilitar la segmentación de públicos, la puesta en valor de recursos endógenos y la mejora de la experiencia del visitante (Pafi *et al.*, 2020).



Por último, la utilidad concreta de este sistema de selección de rutas -relativamente simple- no debe considerarse un fin en sí misma, sino un paso hacia el desarrollo posterior de una herramienta SIG de participación pública en la cualificación del paisaje cultural.

1.5. Ámbito de estudio y fuentes de información

El ámbito de estudio se encuentra en las inmediaciones del Cabo Trafalgar, entre los municipios de Vejer de la Frontera y Barbate (provincia de Cádiz, España) (figura 1).

Se trata de un territorio litoral surcado por una densa red de caminos que conectan relevantes elementos naturales y culturales. Su estado de conservación puede calificarse de excepcional por el abrupto contraste con la conurbación que se extiende por las costas de Málaga y Cádiz. Además, contiene suficientes valores naturales e hitos del patrimonio histórico y cultural, con diverso grado de interés, para estructurar una red de senderos ciclo-senderistas que permita evaluar distintas opciones.

La principal ventaja de utilizar un ámbito de extensión reducida es que el volumen de datos a procesar permite una rápida ejecución de los modelos desarrollados, sin perjuicio de su aplicación a un ámbito más amplio una vez consolidados estos modelos. La diversidad interna del ámbito debe ser la suficiente para proporcionar diferentes escenarios adecuados a diversos perfiles de usuario, condiciones que se cumplen con facilidad en ámbitos de estudio más extensos.

Las fuentes utilizadas han sido la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM) para los datos climáticos y los espacios protegidos en la Red Natura 2000 como Zonas de Especial Conservación (ZEC), y el Nomenclátor para el patrimonio cultural. Se han filtrado los hitos existentes en el ámbito de estudio para considerar sólo aquellos incluidos en la cuenca visual de los senderos propuestos, en tanto forman parte visible del paisaje cultural.

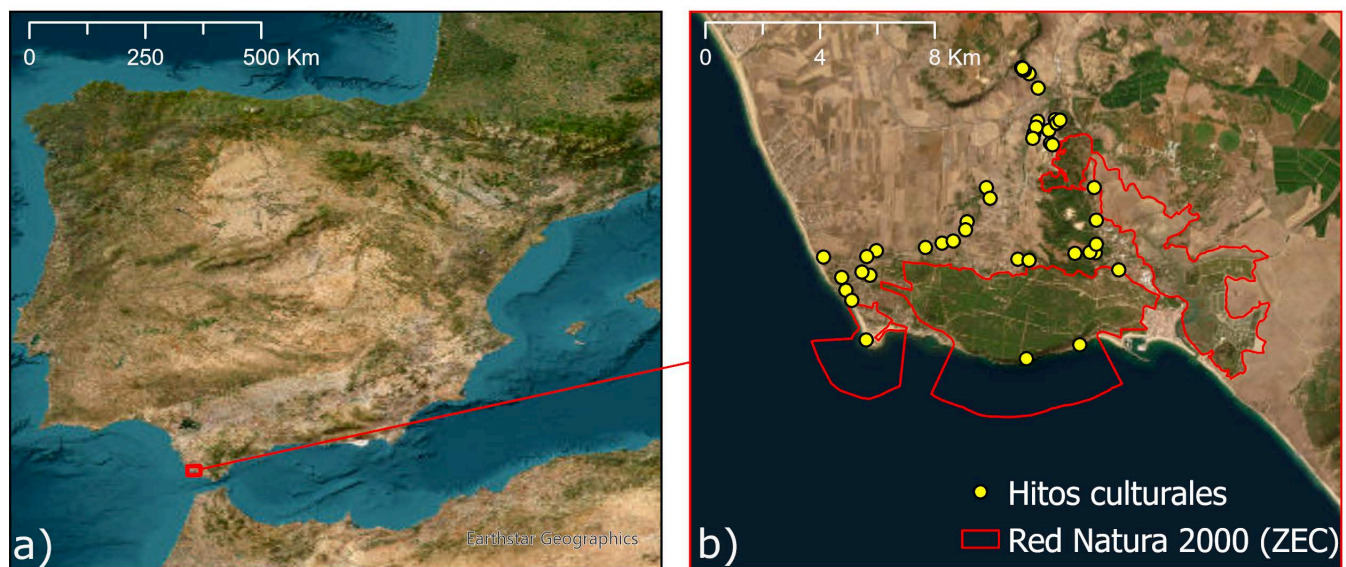


Figura 1. Localización del ámbito (a) y principales componentes territoriales objeto de estudio (b). Fuente: Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM) y Nomenclátor. Elaboración propia.



2. ANTECEDENTES TEÓRICOS

La lógica difusa es idónea para su aplicación en situaciones donde no hay una única solución y las partes implicadas deben converger para alcanzar soluciones equilibradas. El caso más evidente es la evaluación de políticas públicas y programas sociales, donde permite manejar la incertidumbre y la subjetividad en las decisiones. Existen modelos difusos para ponderar criterios como impacto social, costo-beneficio y viabilidad técnica, facilitando la negociación entre las partes interesadas y promoviendo soluciones aceptables para todos.

En México, el programa hábitat se centró en mejorar las condiciones de vida en áreas urbanas marginadas, donde las decisiones sobre la asignación de recursos y prioridades requerían un enfoque equilibrado debido a la diversidad de intereses y necesidades de las comunidades involucradas. Este enfoque permitió que las comunidades participaran activamente en el proceso de toma de decisiones, cediendo en algunas de sus demandas iniciales para alcanzar acuerdos que beneficiarán al colectivo. La lógica difusa ayudó a traducir las preferencias y prioridades de los actores en parámetros cuantificables, haciendo posible una evaluación más inclusiva y equilibrada (Flores & Refugio, 2015).

En medicina se utiliza el mapeo cognitivo difuso (MCD) para construir una comprensión compartida de un problema a través de diversas fuentes de conocimiento. Sarmiento *et al.* (2024) describen 25 casos dispares de aplicación de ésta técnica gráfica con un nexo común, la obtención de una base sistemática y transparente para la toma de decisiones compartida.

Ferreira-Lopes (2018) revisa en las bases de datos de WOS y Scopus las obras publicadas en inglés, español y portugués entre 2010 y 2017 que apliquen técnicas de análisis SIG al patrimonio cultural: tras filtrar 366 publicaciones identificadas inicialmente, la muestra sometida a análisis cualitativo contuvo 108 obras referidas al uso de SIG, predominando absolutamente su aplicación a la gestión integral del patrimonio: identificación, documentación, registro e significación. Solo se incluye una referencia a sistemas de decisión multicriterio, y no hay ninguna referida a la lógica difusa.

Huang (2024) efectúa un sistemático análisis bibliométrico, basado en web of science, de 93 referencias sobre aplicaciones de SIG en estudios patrimoniales publicadas entre 1994 y 2023. Las 42 palabras clave utilizadas en la investigación abarcan el patrimonio cultural, los SIG, el desarrollo sostenible, el análisis espacial, la arqueología, la conservación y la fotogrametría. Dada la amplitud temática del análisis, sorprende que en ningún caso se menciona siquiera la utilización de lógica difusa, evidenciando la escasez de publicaciones en la aplicación de lógica difusa al estudio del patrimonio.

La revisión de la bibliografía sobre SIG aplicados a la arqueología y el patrimonio cultural efectuada por Bognani y Mitri, (2017) incluye 149 publicaciones en inglés e italiano entre 2005 y 2016. Sólo dos incluyen lógica difusa: un análisis estadístico multivariado del patrón de asentamientos en las tierras bajas de Polonia, que identifica los bordes mesetarios como áreas de asentamiento preferentes en la prehistoria (Hildebrandt-Radke & Jasiewicz 2009); y la tesis doctoral de Green (2011), donde propugna la construcción de un SIG temporal difuso para subsanar la tradicional minusvaloración del factor tiempo en el análisis espacial en Arqueología, ya que la lógica difusa es especialmente apropiada para tratar datos imprecisos, característica fundamental de las dataciones arqueológicas, referidas a escalas temporales muy amplias que degradan el potencial del análisis espacial.

3. METODOLOGÍA

El objetivo principal de esta investigación es diseñar un sistema de selección de rutas de interés natural o cultural; como objetivo secundario, deben adaptarse a las preferencias de los usuarios permitiendo elegir las mayores o menores pendientes y temperaturas. Por último, este sistema de selección de rutas debe ser compatible con ulteriores desarrollos que permitan a los usuarios contribuir a la construcción social del paisaje cultural en línea con los denominados Sistemas de Información Geográfica Participativa (SIGP).

Los datos sobre el medio físico, procedentes de la REDIAM, consisten en el modelo digital del terreno (MDT), que representa el relieve del ámbito de estudio, y los espacios naturales protegidos incluidos en la



red natura 2000. se trata de dos zonas de especial conservación (ZEC) incluidas en la red natura 2000, el monumento natural del tómbolo de Trafalgar y el parque natural del pinar de la Breña y marismas del Barbate, sobre las que además recaen otras figuras de protección.

En cuanto a la distribución del patrimonio histórico-cultural, el Nomenclator recoge diferentes elementos de interés cultural presentes en el ámbito de estudio:

- Casco urbano de Vejer de la Frontera, declarado conjunto histórico-artístico.
- Edificaciones rurales (36).
- Hidrónimos y obras hidráulicas (6).
- Elementos singulares: un castillo, una antigua calzada, dos ermitas, cuatro torres y una pista de despegue de parapente.

El punto de partida es una red de cuatro senderos conectados que recorren el ámbito de estudio (figura 2).

La herramienta utilizada para construir el selector de rutas ha sido el constructor de modelos de ArcGIS Pro. Dado que los hitos, naturales y culturales, carecen en muchos casos de acceso desde el viario que recorre el dominio público, y su apreciación se efectúa por conexión visual, se ha prescindido del análisis de redes en el diseño del modelo. En su lugar, se ha optado por calcular las distancias euclidianas entre estos hitos y cuatro rutas que recorren el dominio público, y utilizar lógica difusa para seleccionar las rutas preferentes por su interés natural o cultural, con carácter mutuamente excluyente. Esto implica que la mayor probabilidad de pertenencia al grupo de rutas de interés natural implica una menor probabilidad de pertenencia al grupo de rutas de interés cultural, y viceversa.

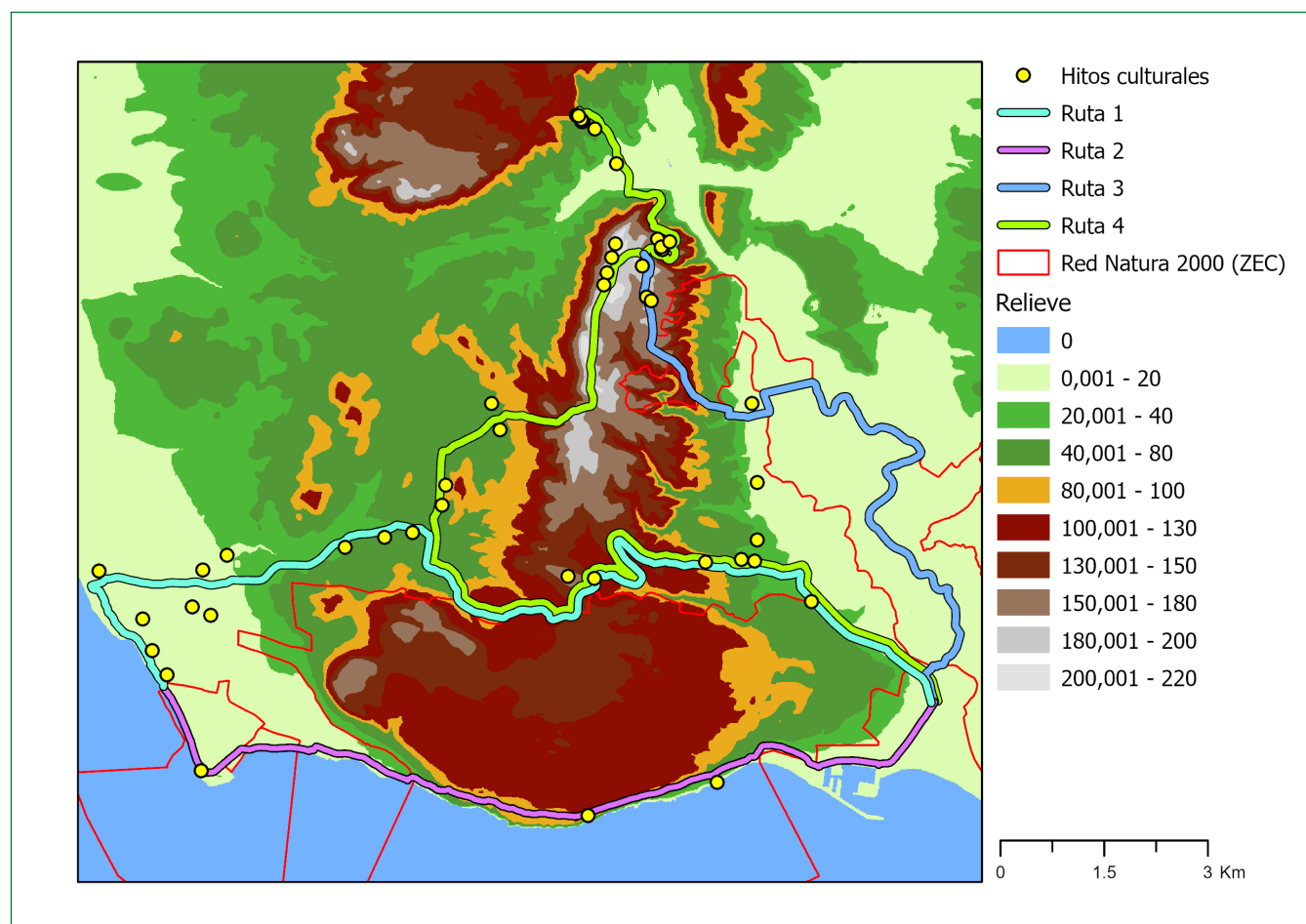


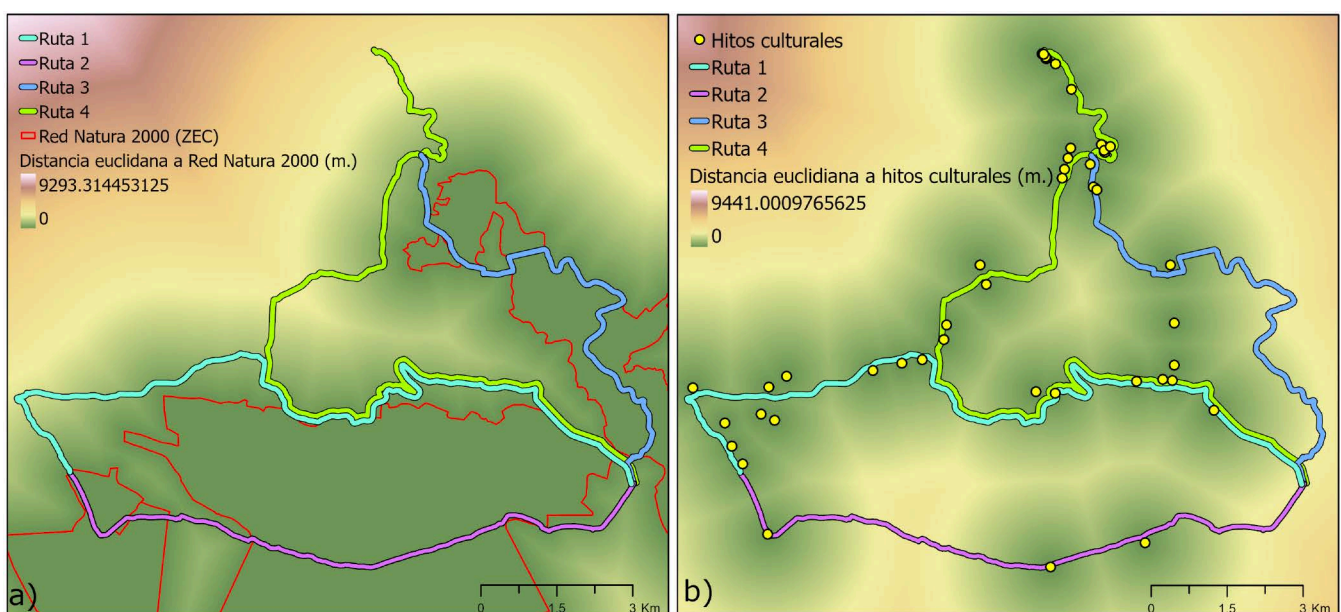
Figura 2. Conjunto de rutas de interés natural y cultural. Fuente: REDIAM y Nomenclátor. Elaboración propia.



La modelización del flujo de procesos (Anexo 1a) consiste en conectar la red de senderos y los datos del territorio como datos de entrada (elipses azules) en las herramientas configuradas ad hoc (rectángulos amarillos) para obtener nueva información (elipses verdes), que, a su vez, se conecta con nuevas herramientas hasta obtener el resultado final.

La interfaz del modelo (Anexo 1b) permite a los usuarios combinar tres variables para obtener diversos resultados: preferencia por rutas de interés natural o cultural; mayor o menor pendiente; y confort climático, entendido como los menores promedios de la temperatura mínima en el mes de julio, y los mayores en el de diciembre.

Las herramientas clave son la de cálculo de distancia euclidiana, que cuantifica la distancia a los hitos naturales (figura 3a) o culturales (figura 3b), y las de pertenencia y superposición difusa (figura 4 y Anexo 2), que permiten seleccionar las preferencias temáticas del usuario.



124

Figura 3. Distancia euclidiana a espacios de la Red Natura 2000 (a) y a hitos culturales (b). Fuente: elaboración propia.

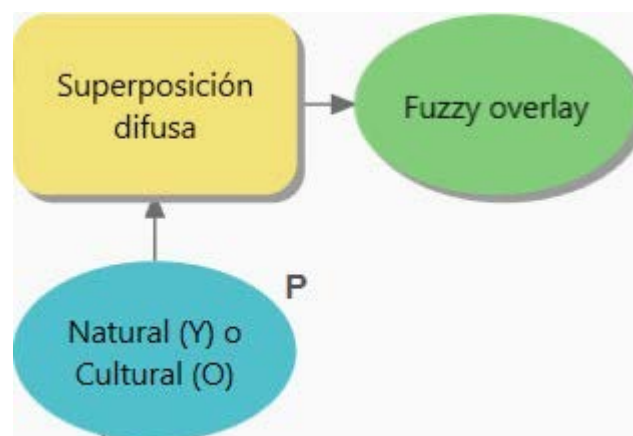


Figura 4. Parámetros de superposición difusa.
Fuente: elaboración propia con ArcGIS Pro Model Builder.



La pertenencia difusa se ha establecido como pequeña para los elementos de interés natural (Anexo 2a), y grande para los de interés cultural (Anexo 2b). En cuanto a la superposición difusa, permite seleccionar los espacios de interés natural o cultural (Anexo 2c) utilizando el operador Y para seleccionar los valores más pequeños, establecidos como de pertenencia difusa al conjunto de interés natural, o el operador O para los más grandes, de interés cultural.

El criterio temático elegido se complementa con dos criterios cuantitativos para presentar rutas alternativas, adaptadas a la condición física de los usuarios: pendiente (figura 5a) y promedio de temperaturas mínimas en julio (figura 5b) y diciembre (figura 5c).

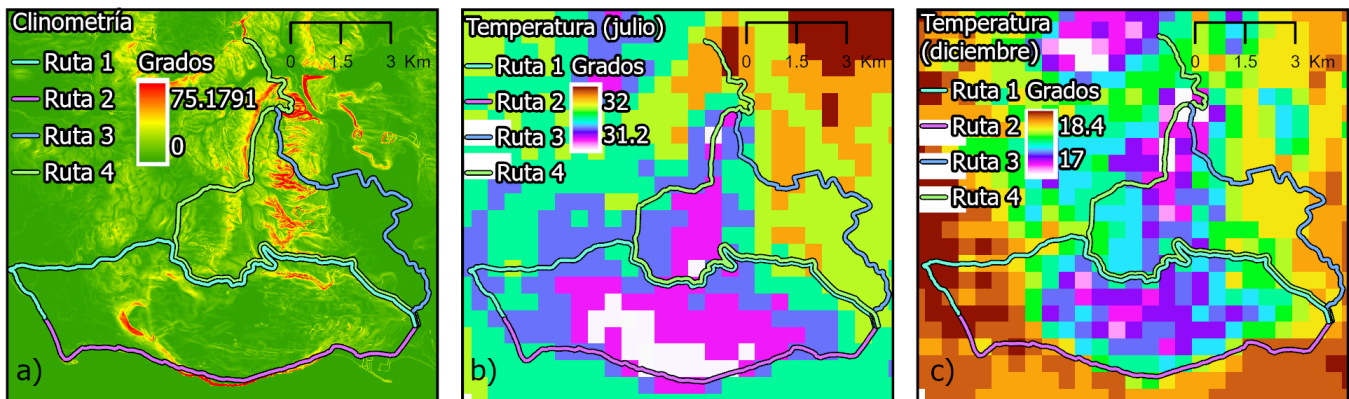


Figura 5. Pendientes (a) y temperaturas medias, en julio (b) y en diciembre (c). Fuente: REDIAM. Elaboración propia.

El modelado SIG ha incluido diversos cálculos geométricos -distancias euclidianas y pendientes- y operaciones de pertenencia y superposición difusa, unión espacial, disolución, fusión y consulta SQL. La herramienta resultante da diversas opciones: tipo de ruta, natural o cultural; criterio climático, ajustando las temperaturas del mes deseado; y pendientes, para elegir las menores si se desea evitar riesgos propios de temperaturas extremas, o las mayores si se prefiere realizar un mayor esfuerzo cuando la temperatura sea propicia.

Estas opciones no agotan las posibilidades en el diseño de la herramienta, pues se podrían incluir otros criterios atendiendo a la información existente: características de los caminos, disponibilidad de fuentes, restauración...

Por último, el propósito específico de esta herramienta se puede complementar con una aplicación que proporcione información sobre los hitos naturales o culturales durante el trayecto, información que constituiría una aportación del usuario a la construcción social del paisaje mediante su tratamiento en un SIGP: el interés que los participantes muestren por cada hito permitiría obtener un indicador precioso para valorar los servicios ecosistémicos de cada bien patrimonial en particular y del paisaje cultural en conjunto.

4. RESULTADOS

De los ocho resultados posibles por combinación de criterios cualitativos y cuantitativos se presentan los correspondientes a las rutas de mayor interés natural con menor pendiente acumulada y mayor confort climático en el mes de diciembre (fig. 6); y las rutas de mayor interés cultural con menor pendiente acumulada y mayor confort climático en el mes de julio (figura 7).

Para verificar la validez de las opciones proporcionadas por el modelo se ha utilizado la calculadora ráster para multiplicar las capas de distancia a la Red Natura 2000 y a los hitos culturales por cada una de las rutas, previamente rasterizadas. Por último, se han elaborado histogramas para obtener la media estadística de



los valores de cada píxel en cada uno de los seis resultados de esta álgebra de mapas (Anexo 3). Asimismo, se han elaborado histogramas de temperaturas (Anexo 4) y clinometría (Anexo 5).

Añadiendo al criterio cualitativo de proximidad a la Red Natura 2000 los criterios cuantitativos de pendiente y confort climático en diciembre, las salidas del modelo ofrecen tres opciones (figura 6); mayor interés natural, independientemente de la temperatura y la pendiente; mayor interés natural y mayor temperatura media en diciembre (ruta 2); y mayor interés natural con menor pendiente acumulada (ruta 3).

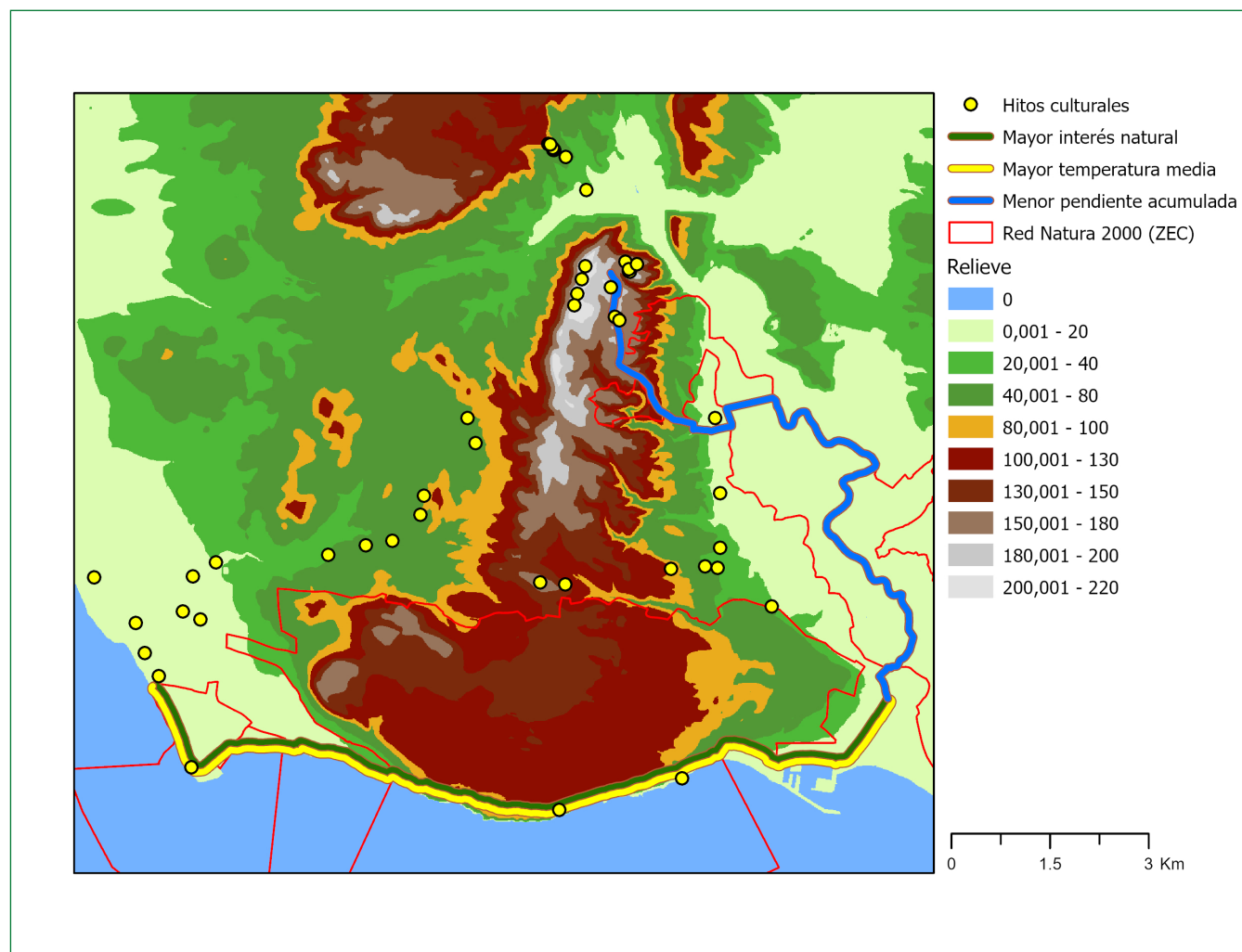


Figura 6. Salidas del modelo: rutas de mayor interés natural, con menor pendiente acumulada y mayor temperatura media en diciembre. Fuente: REDIAM y Toponimia-Nomenclátor. Elaboración propia.

Como se puede observar en el Anexo 3a, la menor distancia a espacios de interés natural se encuentra en la ruta 3, que guarda 53 metros de distancia media respecto a los espacios de la Red Natura 2000, seguida de la ruta 2, que guarda 89 metros de distancia media. La pertenencia difusa selecciona la ruta 2 como óptima por su mayor distancia a los hitos culturales, ya que también se tiene en cuenta su alejamiento de los hitos del patrimonio histórico y cultural y, por tanto, se consideran mutuamente excluyentes el interés natural y cultural.

En cuanto al interés cultural (figura 7), los hitos del patrimonio histórico y cultural se aglomeran al norte y oeste del ámbito de estudio, resultando más accesibles desde la ruta 1 y la ruta 4, que guardan respecto a los hitos culturales 552 y 554 metros de distancia media respectivamente (Anexo 3b).

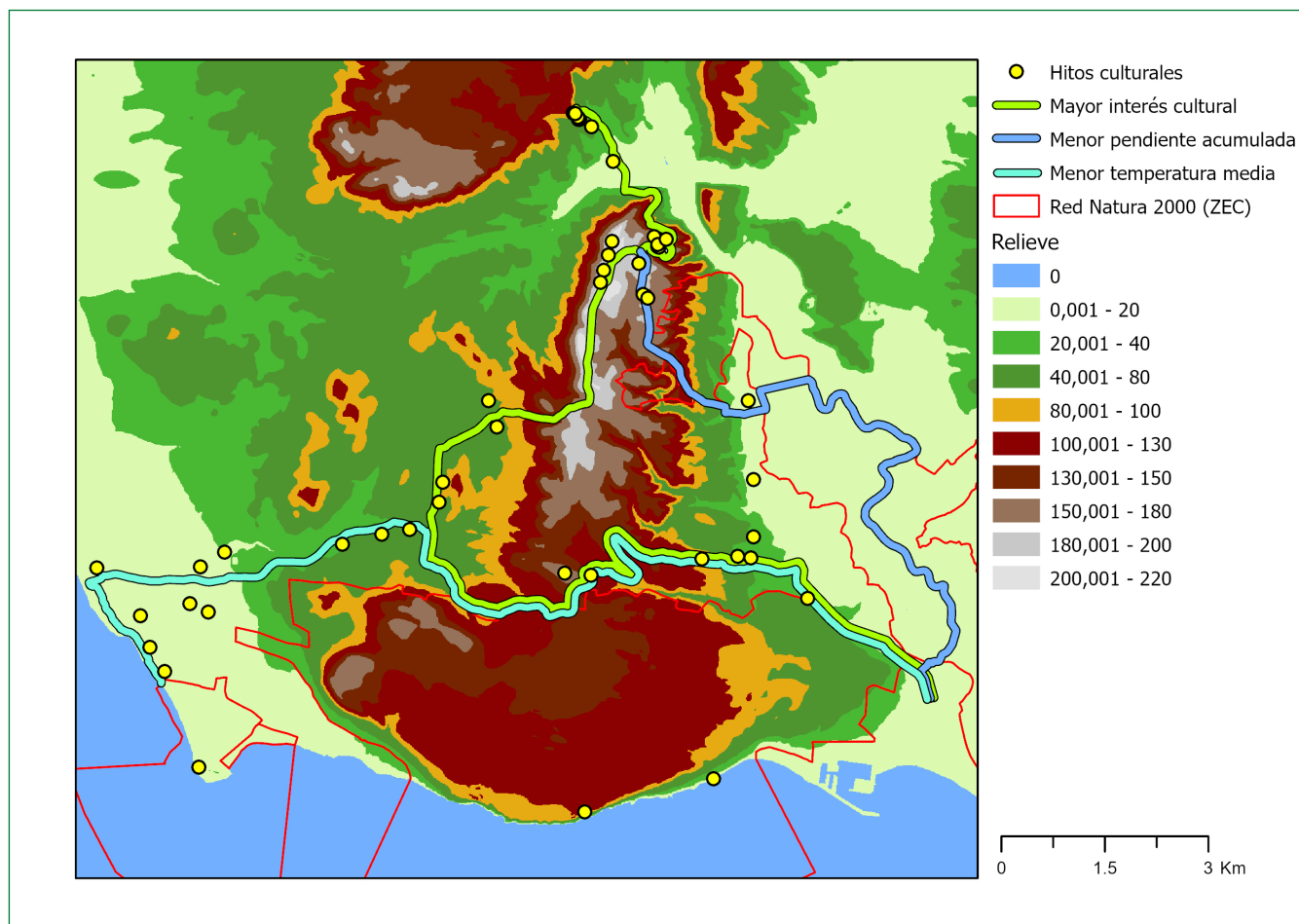


Figura 7. Salidas del modelo: rutas de mayor interés cultural, con menor pendiente acumulada y menor temperatura media en julio. Fuente: elaboración propia.

127

El mayor interés cultural corresponde a la ruta 4; teniendo en cuenta la pendiente, el mayor interés cultural con menor pendiente acumulada corresponde a la ruta 1; y considerando el confort climático, es la ruta 3 la que presenta la menor temperatura media en el mes de julio.

5. DISCUSIÓN

El concepto de ruta debe ser precisado más allá de su carácter temático, naturalista o cultural. En primer lugar, ha de distinguirse del Itinerario Cultural definido por ICOMOS (2008): “toda vía de comunicación terrestre, acuática o de otro tipo, físicamente determinada y caracterizada por poseer su propia y específica dinámica y funcionalidad histórica al servicio de un fin concreto y determinado [...]”. En sentido más amplio, la UNWTO (2018) incluye las rutas históricas y culturales como productos turísticos creados dentro de la tipología del turismo cultural.

Ambas acepciones, estricta o general, pueden utilizarse indistintamente, si bien el Itinerario Cultural sólo adquiere sentido cuando los hitos incluidos están enlazados por un trayecto que proporciona una secuencia perceptiva estructurada, constituyendo en definitiva productos turísticos de calidad; mientras las rutas pueden referirse a recorridos más informales, sin documentación exhaustiva ni requisitos formales de acceso a bienes protegidos, creado con fines de mercantilización turística (Arcila *et al.*, 2015).

Además de considerar las rutas turístico-culturales como productos creados *ad hoc*, Crespi & Planells (2003) señalan que las rutas temáticas basadas en el patrimonio natural o cultural de un territorio deben



estar señalizadas en mapas y proporcionar una experiencia educativa satisfactoria al visitante. Esta es una diferencia relevante con la utilización ciudadana de las redes de caminos públicos, en principio desprovistas de mapas o propósito educativo, donde se hace una libérrima lectura del territorio en tanto sus usuarios son libres de recorrerlos y combinarlos con diversos propósitos sin una lógica estricta.

Complementados por la red viaria, los dominios públicos de vías pecuarias y marítimo-terrestres son escenario de prácticas deportivas y de ocio, desde el ciclismo al simple paseo, incluyendo la observación de la naturaleza y el patrimonio de manera casual o intencional, sin disponer *in situ* de más herramientas que permitan profundizar el conocimiento de los elementos observados que los eventuales paneles informativos instalados en espacios naturales y miradores.

Un requisito previo al análisis de redes es la construcción de la red, elaborada por el usuario o disponible online, que ha de conectar todos los nodos mediante líneas. El análisis de redes es idóneo en espacios urbanos, donde los hitos siempre son accesibles a través del viario. En el caso de las redes de carreteras, o de senderos, el análisis de redes permite acceder a los hitos conectados por dicha red, pero presenta carencias para valorar la experiencia que proporciona el paisaje percibido durante el desplazamiento. Es decir, se abstrae el hito patrimonial de su contexto territorial.

Para poder considerar el paisaje en un análisis de redes, una opción es localizar puntos emisores de vistas de interés. No obstante, el problema persiste: el carácter escaso o excepcional de los miradores implica minusvalorar el trayecto, donde se acumulan multitud de estímulos perceptivos que no deben pasar desapercibidos en la fase de diseño de las rutas.

Este problema puede ser abordado combinando el análisis de redes y el de superposición ponderada para introducir en la selección de rutas turísticas diversas variables de difícil tratamiento por otros medios, tales como la profundidad temporal, la visibilidad, o la polución visual y acústica de los trayectos considerados (López & Linares, 2021).

Algunas aplicaciones de la lógica difusa al tráfico complementan eficazmente el clásico análisis de redes: Singh *et al.* (2018) la utilizan para añadir información sobre el estado del tráfico y seleccionar el camino más rápido, en lugar del más corto; Lee *et al.* (2024) diseñan controladores de lógica difusa para bicicletas eléctricas, ayudando a personas con diversas capacidades a enfrentarse a diversos perfiles de carreteras.

En entornos urbanos, los carriles-bici son compatibles con parques o incluso para atravesar zonas peatonales, donde basta echar pie a tierra para llevar la bicicleta con una mano. Si prácticamente todos los espacios públicos permiten el tránsito ciclo-peatonal, cobra mayor relevancia la lógica difusa ya que permite considerar el espacio en su totalidad utilizando gradientes de membresía, en lugar de los trazos euclidianos propios del análisis de redes.

En esta línea abundan numerosas publicaciones recientes, especialmente sobre ciclabilidad en entornos urbanos, pero no exclusivamente: Min *et al.* (2016) estudian el comportamiento de los peatones basándose en información perceptual; Oliveira *et al.* (2020) evalúan rutas urbanas atendiendo a eventuales perjuicios a la salud, por exposición a gases contaminantes, ruido o accidentes de tráfico; Cekmis (2017) considera además la ciclabilidad del viario, la pendiente y las condiciones del tráfico para seleccionar el viario más adecuado, la menor contaminación por tráfico y el tiempo mínimo de viaje; Huang & Wu (2018) planifican rutas ciclistas teniendo en cuenta las intersecciones no señalizadas en condiciones de flujo de tráfico mixto; a escala regional, Kolisko (2013) considera una región compacta para elaborar un ráster difuso de dificultad para el tránsito de bicicletas, cualificando así las rutas más idóneas para el uso familiar, deportivo o recreativo de manera flexible.

Estos enfoques aminoran incertidumbre y conflictos sociales contribuyendo, en materia de tráfico, al propósito general de la denominada ciencia posnormal: construir una interfaz ciencia-política que incluya consideraciones éticas y participación pública equitativa en la generación del conocimiento para garantizar que redunde en beneficio de todos (Pedregal & Segura, 2018).

Una ventaja evidente de la lógica difusa sobre el análisis de redes es su carácter inconexo: en redes, transitar de un lugar a otro exige concretar los nodos de origen y destino, que han de estar unidos por segmentos de la red. Pero la mayor parte del paisaje ha de apreciarse desde el camino, a cierta distancia, sin aproximarse en exceso a los bienes contemplados. En cuanto al patrimonio histórico y cultural, puede ser



visitable o estar estrictamente prohibido hacerlo al tratarse de bienes protegidos o propiedades privadas, en cuyo caso ha de contemplarse como un elemento de paisaje.

Los valores del paisaje, incluyendo los elementos patrimoniales que contiene, proporcionan estímulos visuales accesibles mediante recorridos, pero estos valores difícilmente pueden concretarse en nodos salvo casos puntuales, como los miradores, que han de ser considerados excepciones. Por el contrario, la plasmación gráfica del conjunto de estos valores se obtiene con mayor facilidad calculando la cuenca visual del trayecto, a partir de la cual se obtiene la calidad y fragilidad del paisaje.

Esta plasmación de la información de superficies en lugar de nodos remarca la utilidad de lógica difusa como alternativa al análisis de red. Las herramientas SIG de membresía y superposición difusa permiten cualificar el territorio en su conjunto atendiendo a sus valores naturales y a los del patrimonio histórico-cultural, incluidos valores intangibles. Así es posible discriminar flexiblemente las rutas atendiendo a las temáticas preferentes, natural o cultural, y combinarlas con otras variables, por ejemplo, los niveles deseados de esfuerzo y confort climático estacional.

En los ejemplos presentados se han combinado determinados criterios para mostrar las diferencias en la selección de rutas, pero es posible hacer otras combinaciones de criterios, así como incorporar todos los promedios de temperatura mensuales.

También sería posible diseñar rutas temáticas más específicas, discriminando el patrimonio natural y cultural atendiendo a sus características, por ejemplo, el interés ornitológico o etnológico.

Otra ventaja de la utilización de lógica difusa reside en las posibilidades que ofrece para la cualificación del paisaje cultural mediante participación pública. Las citadas barreras a la participación pública mediante SIGP (Ramírez *et al.*, 2023) son progresivamente superables gracias a las nuevas tecnologías (Pérez & Maruri, 2024), ya que la popularización de la telefonía móvil y la creciente cobertura de la red de telecomunicaciones facilitan incorporar estos dispositivos a los SIGP, eliminando en gran medida la barrera tecnológica en buena parte del territorio.

Tras ella caerán la barrera epistemológica y la cultural, pues nada impide impulsar aplicaciones que, con raíces en el campo disciplinar de la geografía, incluyan otras disciplinas para impulsar la participación pública en la construcción social del paisaje cultural en las líneas propugnadas por la nueva cultura del territorio (AGE, 2006) sobre políticas del paisaje y de infraestructura verde del territorio, equidad y justicia ambiental, activación del patrimonio territorial y transparencia en los procesos administrativos.

Esta participación pública, además de evaluar la satisfacción de los usuarios con las rutas recomendadas, podría ser de gran utilidad para generar otros datos de gran utilidad. Por ejemplo, la percepción de los valores ambientales y culturales por los usuarios podría ser contrastada con la valoración de estos por los expertos para detectar eventuales discrepancias e implementar estrategias de protección y divulgación más eficientes.

6. CONCLUSIONES

La novedad de la metodología propuesta la distingue de las antes citadas en tres aspectos fundamentales. En primer lugar, por la aplicación de herramientas SIG de lógica difusa para ponderar por su proximidad al viario ciclo-peatonal valores cualitativos, naturales o culturales. Esta innovación metodológica permite una evaluación más flexible y contextualizada de los recursos territoriales, facilitando relacionar áreas de alto valor patrimonial con las infraestructuras de movilidad sostenible.

En segundo lugar, la metodología incorpora la posibilidad de añadir factores cuantitativos específicos, tales como la pendiente del terreno y el confort climático del mes seleccionado. Esta capacidad de integrar múltiples dimensiones en el análisis contribuye a una evaluación más holística y adaptativa, ajustándose a las condiciones específicas y temporales del entorno, lo que permite mejorar la precisión del análisis y la planificación individual de las rutas, haciéndola más dinámica y eficiente al atender a las variaciones estacionales y a las necesidades específicas de los usuarios.



El tercer aspecto diferenciador es el propósito de la metodología: contribuir a la construcción de territorios inteligentes, donde se reduzca la incertidumbre de los potenciales visitantes sobre la adecuación de la red de senderos a sus preferencias y limitaciones, para aumentar así la resiliencia de territorios con componente turística frente al calentamiento global.

Los territorios dotados de elementos patrimoniales tienen una fuerte conexión con la identidad y las raíces culturales de la sociedad. La divulgación del patrimonio natural y cultural permite orientar en beneficio colectivo la toma de decisiones particulares en materia de actividades recreativas y turísticas.

Mediante herramientas divulgativas y participativas como la propuesta, que sugiere las alternativas adecuadas para cada usuario en cada momento, se promueven actividades complementarias entre sí -deportivas, culturales y de ocio al aire libre- y se facilita su óptima integración en el sistema socio-ecológico territorial. La amplia disponibilidad de teléfonos inteligentes y cobertura de telecomunicaciones aconseja prescindir en gran medida de los tradicionales paneles informativos, obsoletos y costosos, ya que implican su periódica reposición cuando el paso del tiempo y las inclemencias meteorológicas los deterioran hasta ser ilegibles, degradando el paisaje en lugar de informar.

Enriquecer así la experiencia del visitante refuerza el vínculo entre la comunidad y su patrimonio, junto al sentido de pertenencia y responsabilidad compartida, la valoración social de los servicios ecosistémicos y etnológicos que ofrece el territorio y el reconocimiento de cómo estos repercuten en el bienestar.

Sin perjuicio de una aplicación rígida de la normativa en materia de protección del patrimonio y gestión del territorio, es importante señalar que, desde la perspectiva de la ciencia posnormal, el enfoque estrictamente administrativo debe confluir con otros enfoques más flexibles para abordar la complejidad y la incertidumbre inherentes a la gestión territorial, facilitando implementar estrategias de conservación más adaptativas y participativas. De esta manera, es posible fomentar un diálogo continuo entre las políticas de conservación y las prácticas comunitarias, asegurando que las medidas adoptadas sean efectivas y sostenibles a largo plazo.

Declaración de disponibilidad de datos

130

Rutas_Janda.zip, ejecutable con ArcGIS Pro, disponible en el Repositorio de Mendeley: Fernández-Enríquez, Alfredo (2025), "Rutas_Janda", Mendeley Data, V1, doi: [10.17632/62m8mtrv8f.1](https://doi.org/10.17632/62m8mtrv8f.1)

Financiación

Esta investigación se incluye en el proyecto "Evaluación de servicios ecosistémicos del paisaje cultural de la campiña litoral de Cádiz", adjudicatario de una de las "Ayudas a proyectos para el impulso de la economía azul. Transferencia e innovación" del Plan Propio CEI-MAR 2023 del Campus de Excelencia Internacional del Mar.

Declaración responsable y conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés con relación a la publicación de este artículo.
Contribución de cada uno de los autores:

- Alfredo Fernández-Enríquez: Fuentes de datos, selección de rutas, diseño del modelo, trabajo de campo, elaboración cartográfica y redacción.
- Manuel Arcila-Garrido: Fuentes de datos, selección de rutas y diseño del modelo.
- Gema Ramírez-Guerrero: Fuentes de datos, trabajo de campo, elaboración cartográfica y redacción.
- Javier García-Onetti: Fuentes de datos, selección de rutas, trabajo de campo y redacción.



REFERENCIAS

- Addoun, M., Chachour, M., & Zerouala, M. S. (2023). A strategy for the design of a cultural tourist route. Case study of the city of Tlemcen in Algeria. *PASOS. Revista de Turismo y Patrimonio Cultural*, 21(4), 743-765. <https://doi.org/10.25145/pasos.2023.21.051>
- Álvarez Larrain, A., & McCall, M. K. (2019). Participatory mapping and participatory GIS for historical and archaeological landscape studies: a critical review. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 26. <https://doi.org/10.1007/s10816-018-9385-z>
- Azzurro, A. E., & Cerri, J. (2021). Participatory mapping of invasive species: A demonstration in a coastal lagoon. *Marine Policy*, Volume 126. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104412>
- Arcila Garrido, M., López Sánchez, J. A., & Fernández Enríquez, A. (2015). Rutas turísticos-culturales e itinerarios culturales como productos turísticos: reflexiones sobre una metodología para su diseño y evaluación. In J. de la Riva, P. Ibarra, R. Montorio, & M. Rodrigues (Eds.), *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación* (pp. 463-471). Universidad de Zaragoza-AGE. https://www.researchgate.net/publication/283623753_Rutas_turisticos-culturales_e_itinerarios_culturales_como_productos_turisticos_reflexiones_sobre_una_metodologia_para_su_diseno_y_evaluacion
- Asociación Española de Geografía (2025, 18 de abril). *Manifiesto por una Nueva Cultura del Territorio*. <https://www.age-geografia.es/site/manifiesto-nueva-cultura-del-territorio/>
- Barnett, A. J., Wiber, M. G., Rooney, M. P., & Curtis Maillet, D. G. (2016). The role of public participation GIS (PPGIS) and fishermen's perceptions of risk in marine debris mitigation in the Bay of Fundy, Canada. *Ocean & Coastal Management*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.09.002>
- Basupi, L. V., Quinn, C. H., & Dougill, A. J. (2017). Using participatory mapping and a participatory geographic information system in pastoral land use investigation: Impacts of rangeland policy in Botswana. *Land Use Policy*, 64. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.03.007>
- Blake, D., Augé, A. A., & Sherren, K. (2017). Participatory mapping to elicit cultural coastal values for Marine Spatial Planning in a remote archipelago. *Ocean & Coastal Management*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.08.010>
- Bijker, R. A., & Sijtsma, F. J. (2017). A portfolio of natural places: Using a participatory GIS tool to compare the appreciation and use of green spaces inside and outside urban areas by urban residents. *Landscape and Urban Planning*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.10.004>
- Bogdani, J., & Mitri, E. (2017). A Bibliography on the Application of GIS in Archaeology and Cultural Heritage. *Groma. Documenting archaeology*, 13. <https://doi.org/10.12977/groma12>
- Brown, G., Strickland-Munro, J., Kobryn, H., & Moore, S. A. (2017). Mixed methods participatory GIS: An evaluation of the validity of qualitative and quantitative mapping methods, *Applied Geography*, 79. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.12.015>
- Brown, G., Weber, D., & de Bie, K. (2014). Assessing the value of public lands using public participation GIS (PPGIS) and social landscape metrics. *Applied Geography*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.06.006>
- Calderón-Puerta, D. M., & Arcila-Garrido, M. (2020). Proposal for the Design of Cultural Tourist Routes through the Use of GIS: An Applied Case. *Revista de Estudios Andaluces*, (39), 134-148. <https://dx.doi.org/10.12795/rea.2020.i39.07>
- Calderón-Puerta, D. M., Arcila-Garrido, M., & López-Sánchez, J. A. (2018). Las Rutas e Itinerarios Turístico-Culturales en los Portales Oficiales de Turismo de las Comunidades Autónomas Españolas. *Revista de Estudios Andaluces*, (35), 123-145. <http://dx.doi.org/10.12795/rea.2018.i35.05>
- Capel, H. (2005). Las rutas culturales como patrimonio de la Humanidad. El caso de las fortificaciones americanas del Pacífico. *Biblio 3W. Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*, X (562), 1-25. <http://www.ub.edu/geocrit/b3w-562.htm>
- Cekmis, A. (2017). Fuzzy modeling for route characteristic. *Procedia Computer Science*, 120, 112-119. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.217>
- Chrysafiadi, K., Kontogianni, A., Virvou, M., & Alepis, E. (2025). Enhancing User Experience in Smart Tourism via Fuzzy Logic-Based Personalization. *Mathematics*, 13, 846. <https://doi.org/10.3390/math13050846>



- Corzo Arévalo, D. (2020). Diseño de una ruta de turismo histórico cultural usando Google Maps como Sistema de Información Geográfica (SIG). Caso de estudio: centro histórico de Bucaramanga. *Revista Turydes: Turismo y Desarrollo*, (29). <https://www.eumed.net/es/revistas/turydes/vol-13-no-29-diciembre-dezembro-2020/ruta-turismo-cultural>
- Crespi, M., & Planells, M. (2003). *Patrimonio Cultural*. Síntesis.
- Czembrowski, P., Kronenberg, J., & Czepkiewicz, M. (2016). Integrating non-monetary and monetary valuation methods – SoftGIS and hedonic pricing. *Ecological Economics*, 130. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.07.004>
- Del Espino Hidalgo, B. et al. (2022). Indicadores de accesibilidad para la evaluación del patrimonio cultural como recurso de desarrollo en áreas rurales de Huelva. *ACE: Architecture, City and Environment*, 17(50), 11375. <https://dx.doi.org/10.5821/ace.17.50.11375>
- Dourteau, M., Cerezo Andreo, F., & Arcila Garrido, M. (2022). Los SIG aplicados al estudio del paisaje cultural marítimo: Colonia del Sacramento desde el siglo XVII al XX. *Papeles de Geografía*, (67), 98–114. <https://doi.org/10.6018/geografia.486631>
- Duarte-Duarte, J. B., Talero-Sarmiento, L. H., & Rodríguez-Padilla D. C. (2021). Methodological proposal for the identification of tourist routes in a particular region through clustering techniques. *Heliyon*, 7(4), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06655>
- ESRI. (2025, 18 de abril). Optimización de rutas para el mundo real. <https://www.esri.com/es-es/industries/logistics-distribution/strategies/route-planning-optimization>
- Fagerholm, N., Oteros-Rozas, E., Raymond, C. M., Torralba, M., Moreno, G. & Plieninger, T. (2016). Assessing linkages between ecosystem services, land-use and well-being in an agroforestry landscape using public participation GIS. *Applied Geography*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.06.007>
- Fernández-Enríquez, A., Arcila-Garrido, M., Ramírez-Guerrero, G. & García-Onetti, J. (2024). *Diseño adaptativo de rutas naturalistas y culturales con herramientas SIG*. [Comunicación en congreso]. IX Congreso del Grupo de Estudios Regionales (A.G.E), Sevilla, España. <https://www.age-geografia.es/site/wp-content/uploads/2024/10/Libro-de-Actas-IX-Congreso-Grupo-Estudios-Regionales.pdf>
- Fernández-Laso, M. C., & López Ronco, M. A. (2022). Tourist-cultural routes in the Community of Madrid. *Journal of Tourism and Heritage Research*, 5(2), 216-237. <https://www.jthr.es/index.php/journal/article/view/368>
- Ferreira-Lopes, P. (2018). Achieving the state of research pertaining to GIS applications for cultural heritage by a systematic literature review. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-4, 169–175. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-169-2018>
- Flores Payán, L., & Refugio Vallejo, J. (2015). Evaluación de políticas y programas sociales mediante lógica difusa. *Nóesis. Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 24(47), 82-113. <https://doi.org/10.20983/noesis.2015.1.3>
- Fundación Biodiversidad (2025, 25 de abril). *Programa Pleamar: Audioguías del mar*. https://www.programapleamar.es/sites/default/files/recursos/documentos/inventario_de_patrimonio_def_recuperado.pdf
- Green, C. T. (2011). *Winding Dali's Clock: The Construction of a Fuzzy Temporal-GIS for Archaeology*. [Tesis Doctoral, Universidad de Oxford]. Archaeopress. <https://doi.org/10.30861/9781407307961>
- Hildebrandt-Radke, I., & Jasiewicz, J. (2009). Using Multivariate Statistics and Fuzzy Logic System to Analyse Settlement Preferences in Lowland Areas of the Temperate Zone: An Example from the Polish Lowlands. *Journal of Archaeological Science*, 36(10). <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.06.004>
- Huang, Y. (2024). Bibliometric analysis of GIS applications in heritage studies based on Web of Science from 1994 to 2023. *Herit Sci* 12, 57. <https://doi.org/10.1186/s40494-024-01163-y>
- Huang, L., & Wu, J. (2008). *Fuzzy Logic Based Cyclists' Path Planning Behavioral Model in Mixed Traffic Flow*. [Comunicación en congreso]. 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2008.4732670>
- ICOMOS (2025, 18 de abril). *Carta de Itinerarios Culturales, 16ª Asamblea General*. https://admin.icomos.org/wp-content/uploads/2023/01/culturalroutes_sp.pdf
- Jewpanya, P., Nuangpirom, P., Nakkiew, W., Pitjamit, S., & Jaichomphu, P. (2025). Optimizing Tourist Destination Selection Using AHP and Fuzzy AHP Based on Individual Preferences for Personalized Tourism. *Sustainability*, 17, 1116. <https://doi.org/10.3390/su17031116>
- Kolisko, P. (2013). Bike Trail Difficulty Rating in the South Moravian Region Modelled Using Fuzzy Sets. *Geoinformatics FCE CTU*, 11, 5-24. <https://doi.org/10.14311/gi.11.1>



- Korpilo, S., Nyberg, E., Vierikko, K., Nieminen, H., Arciniegas, G., & Raymond, C.M. (2023). Developing a Multi-sensory Public Participation GIS (MSPPGIS) method for integrating landscape values and soundscapes of urban green infrastructure. *Landscape and Urban Planning*, 230. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104617>
- Laatikainen, T., Tenkanen, H., Kyttä, M., & Toivonen, T. (2015). Comparing conventional and PPGIS approaches in measuring equality of access to urban aquatic environments, *Landscape and Urban Planning*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.08.004>
- Lee, J-S., Chen, Z-H., & Hong, Y. (2024). Enhancing Urban Mobility with Self-Tuning Fuzzy Logic Controllers for Power-Assisted Bicycles in Smart Cities. *Sensors*, 24(5), 1552. <https://doi.org/10.3390/s24051552>
- López Guzmán, T. J., Lara de Vicente, F., & Merinero, R. (2006). Las rutas turísticas como motor de desarrollo local. El caso de la Ruta de "El Tempranillo". *Estudios Turísticos*, 137, 131-145. <https://doi.org/10.61520/et.1672006.970>
- López Morales, F. J., & Vidargas, F. (2025, 18 de abril). *Itinerarios culturales: planes de manejo y turismo sustentable*. [https://openarchive.icomos.org/id/eprint/1032/1/Itinerarios_Culturales_\(2011\).pdf](https://openarchive.icomos.org/id/eprint/1032/1/Itinerarios_Culturales_(2011).pdf)
- López Sánchez, M., & Linares Gómez del Pulgar, M. (2021). *GIS-based Architectural Design in Heritage Landscapes: towards a Knowledge-based Definition of Touristic Routes*. [Comunicación en congreso]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1165/1/012006>
- Merino-del Río, R.; Tejedor-Cabrera, A., & Linares-Gómez M. (2020). *Aplicaciones basadas en los SIG para el diseño de itinerarios culturales en paisajes con valores patrimoniales difusos. El caso del territorio del Bajo Guadalquivir (Conjunto Arqueológico de Itálica): Revisión sistemática de literatura científica*. [Comunicación en congreso]. III Congreso Internacional ISUF-H. Ciudad compacta vs. Ciudad difusa. Editorial Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/ISUFh2019.2020.9684>
- Min Zhou, M., Dong, H., Wang, F.Y., Wang, Q., & Yang, X. (2016). Modeling and simulation of pedestrian dynamical behavior based on a fuzzy logic approach. *Information Sciences*, 360, 112-130. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.04.018>
- Moral, M. (2016). La puesta en valor de un recurso turístico cultural sostenible en el medio rural: El caso de las Vías Verdes en España. *Revista Interamericana de Ambiente y Turismo*, 12(2), 161-175. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5906072>
- Moreno Veloza, L.E., & Garzón Martínez, M.A. (2019). Del infierno al cielo en Boyacá: valoración patrimonial de un camino. *Revista de Antropología Y Sociología: Virajes*, 21(2), 133-155. <https://doi.org/10.17151/rasv.2019.21.2.7>
- Morère Molinero, N. (2012). Sobre los itinerarios culturales del ICOMOS y las rutas temáticas turístico culturales. Una reflexión sobre su integración en el turismo. *Revista de Análisis Turístico*, 13, 57-68. https://www.researchgate.net/publication/306442757_Sobre_los_itinerarios_culturales_del_Icomos_y_las_rutas_tematicas_turistico-culturales_Una_reflexion_sobre_su_integracion_en_el_turismo
- Navalón García, R. (2014). *Escenarios, imaginarios y gestión del patrimonio*. Ed. Servicio de Publicaciones de la Universidad Autónoma Metropolitana – Xochimilco (México) y Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alicante, (pp. 207-217). <https://www.cervantesvirtual.com/obra/escenarios-imaginarios-y-gestion-del-patrimonio-vol-1/>
- Oliveira, F., Costa, D. G., Duran-Faundez, C., & Dias, A. (2020). BikeWay: A Multi-Sensory Fuzzy-Based Quality Metric for Bike Paths and Tracks in Urban Areas. *IEEE Access*, Vol. 8, 227313-227326. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3046017>
- Pafi, M., Flannery, W., & Murtagh, B. (2020). Coastal tourism, market segmentation and contested landscapes. *Marine Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.MARPOL.2020.104189>
- Pedregal Mateos, B. & Segura Calero, S. (2018). Territorio y ciencia posnormal. In J. Farinós, (Coord.), J. Farinós & E. Peiró (Eds.), *Territorio y Estados. Elementos para la coordinación de las políticas de ordenación del territorio en el siglo XXI* (pp. 97-114). Editorial Tirant Humanidades.
- Pérez Cano, M. T., & Maruri Arana, A. (2024). Cultural Landscape and Heritage as an Opportunity for Territorial Resilience—The Case of the Border Between Castile and Leon and Cantabria. *Land*, 13(12), 2233. <https://doi.org/10.3390/land13122233>
- Pietrzyk-Kaszyńska, A., Czepkiewicz, M., & Kronenberg, J. (2017). Eliciting non-monetary values of formal and informal urban green spaces using public participation GIS, *Landscape and Urban Planning*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.12.012>
- Ramírez Aranda, N., De Waegemaeker, J., & Van de Weghe, N. (2023). The evolution of public participation GIS (PPGIS) barriers in spatial planning practice, *Applied Geography*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2023.102940>

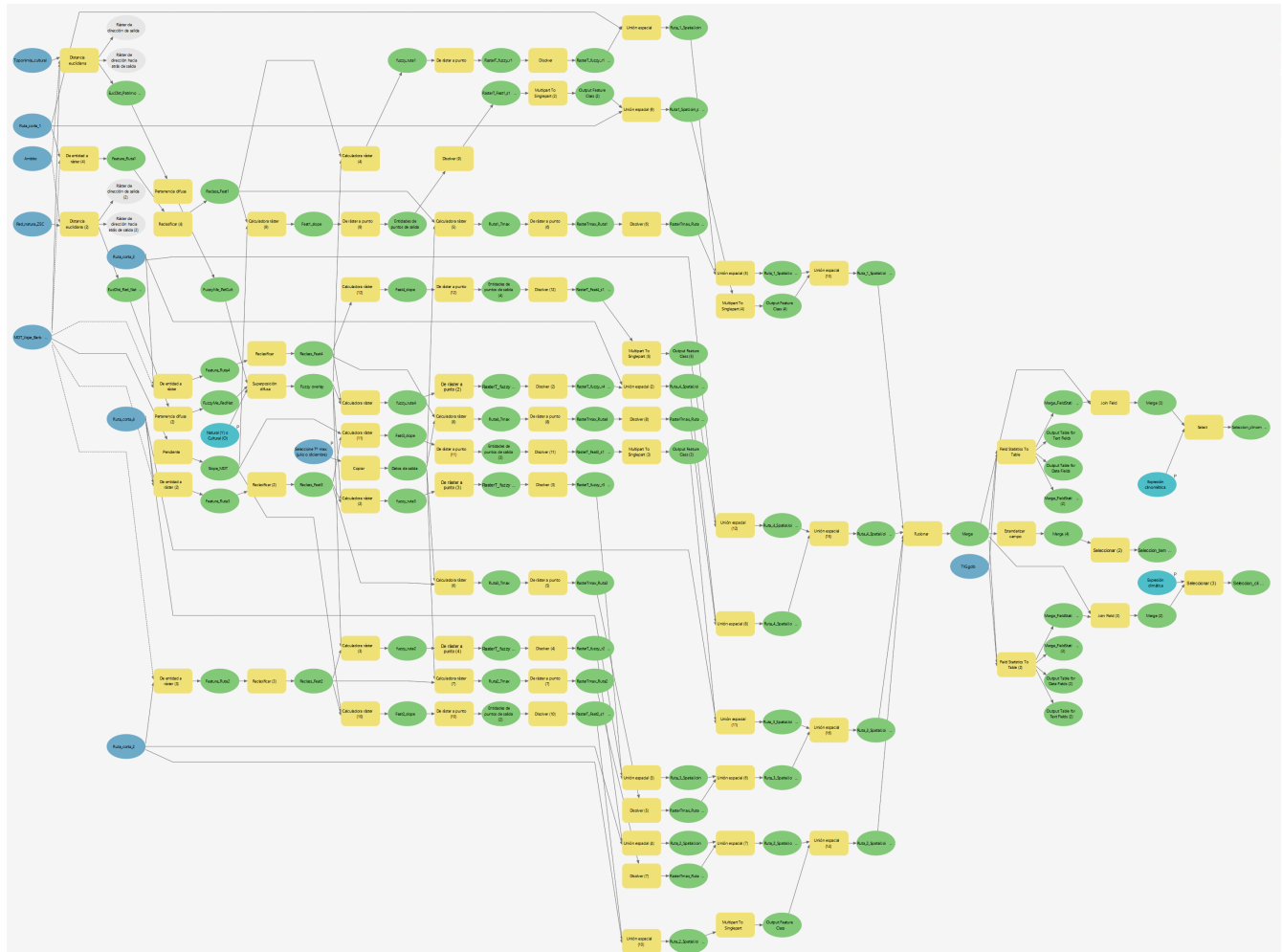


- Russo, A. P. (2004). Portales culturales: E-culture para un desarrollo sostenible en regiones turísticas. *Scripta Nova. Revista electrónica de geografía y ciencias sociales.*, vol. VIII, 170(13). Universidad de Barcelona. <http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-170-13.htm>
- Sánchez-Martín, J. M., Gurría-Gascón, J. L., & García-Berzosa, M. J. (2020). The Cultural Heritage and the Shaping of Tourist Itineraries in Rural Areas: The Case of Historical Ensembles of Extremadura, Spain. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4), 200. <https://doi.org/10.3390/ijgi9040200>
- Sarmiento, I., Cockcroft, A., Dion, A., Belaid, L., Silver, H., Pizarro, K., Pimentel, J., Skeritt, L., Ghadirian, M. Z., Gagnon-Dufresne, M.-C., & Andersson, N. (2024). Fuzzy cognitive mapping in participatory research and decision making: a practice review. *Arch Public Health* 82, 76. <https://doi.org/10.1186/s13690-024-01303-7>
- Singh Tomar, A., Singh, M., Sharma, G., & Arya, K.V. (2018). Traffic Management using Logistic Regression with Fuzzy Logic. *Procedia Computer Science*, 132, 451-460. Consultado el 21 de marzo de 2024. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.05.159>
- Suárez Alfonso, J. L., Rouco Méndez, A. J., & García Lorenzo, U. F. (2023). Para proteger y divulgar el patrimonio de San Miguel del Padrón: Ruta Cultural Benny Moré. *Arquitectura y Urbanismo*, XLIV(3), 53-71. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=376876173006>
- UNWTO (2025, 18 de abril). *2nd International Congress on World Civilizations and Historic Routes*. <https://www.unwto.org/europe/event/2nd-international-congress-world-civilizations-and-historic-routes>
- Ventura Fernández, J., López Magán, E., & Quetglas Llul, L. (2023). *Aproximación al uso turístico de las vías verdes andaluzas a partir del estudio estadístico de cuatro casos representativos*. [Comunicación en congreso]. Geografía: cambios, retos y adaptación: libro de actas. XVIII Congreso de la Asociación Española de Geografía, Logroño, España. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9075390>
- Yang, X., & Shen, J. (2023). Landscape Sensitivity Assessment of Historic Districts Using a GIS-Based Method: A Case Study of Beishan Street in Hangzhou, China. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 12, 462. <https://doi.org/10.3390/ijgi12110462>
- Yao, Y., Wang, X., Luo, L., Wan, H., & Ren, H. (2023). An Overview of GIS-RS Applications for Archaeological and Cultural Heritage under the DBAR-Heritage Mission. *Remote Sens.*, 15, 5766. <https://doi.org/10.3390/rs15245766>
- Zadeh L. A. (1996). Nacimiento y evolución de la lógica difusa, el soft computing y la computación con palabras: un punto de vista personal. *Psicothema*, 8(2), 421-429.
- Zamora Merchán, M. (2017). El uso de los SIG en la arqueología española: enfoques y planteamientos, veinte años después. *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología*, (2). <https://doi.org/10.15366/ane2.blasco2016.025>
- Zhang, D., Mohammed, S., & Calvi, A. (2021). Special Issue: Fuzzy logic systems for transportation engineering. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 41, 4705-4712. <https://doi.org/10.3233/JIFS-189957>



ANEXOS (ELABORACIÓN PROPIA CON ARCGIS MODEL BUILDER)

ANEXO 1. Modelización del flujo de procesos





ANEXO 2. Interfaz del modelo

Geoprocessing

Rutas naturalistas y culturales

Parameters Environments

Natural (Y) o Cultural (O)
Y

Seleccione Tº max. (julio o diciembre)
T_max_julio_Resample

Expresión climática
Load Save Remove

SQL

Where MIN_GRID_C is equi Minimum

+ Add Clause

Expresión clinométrica
Load Save Remove

SQL

Where MAX_GRID_C is equi Minimum

+ Add Clause

136

Configuración de las herramientas de membresía difusa de las rutas de interés naturalista (a), de las de interés cultural (b) y de su superposición difusa (c y d)

Pertenencia difusa (2): Fuzzy Membership

Parameters Environments Properties

Input raster
EucDist_Red_Natura_ZEC

Output raster
FuzzyMe_RedNat

Membership type
MS Small

Mean multiplier
1

Standard deviation multiplier
1

Hedge
Very

a) OK

Pertenencia difusa: Fuzzy Membership

Parameters Environments Properties

Input raster
EucDist_Patrimonio_cultural

Output raster
FuzzyMe_PatCult

Membership type
Large

Midpoint
4720.50048828125

Spread
5

Hedge
Very

b) OK

Superposición difusa: Fuzzy Overlay

Parameters Environments Properties

Input rasters
FuzzyMe_PatCult
FuzzyMe_RedNat

Output raster
FuzzyOv_Fuzz1

Overlay type
Natural (Y) o Cultural (O)

c) OK

Overlay type (Optional)

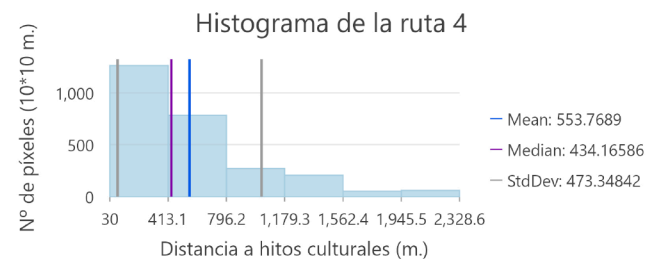
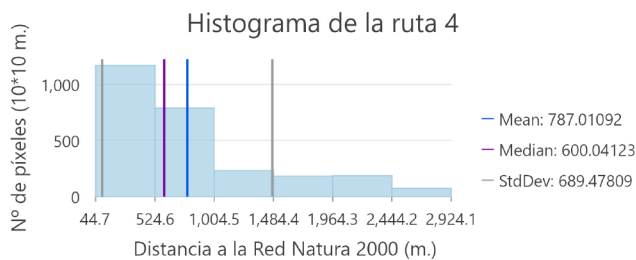
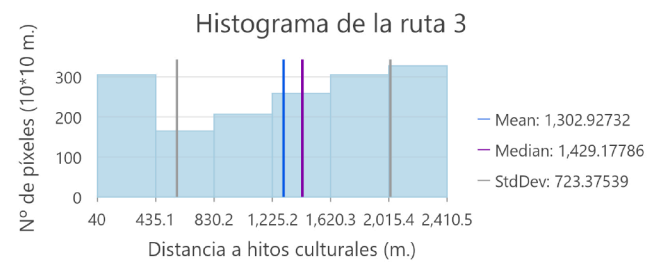
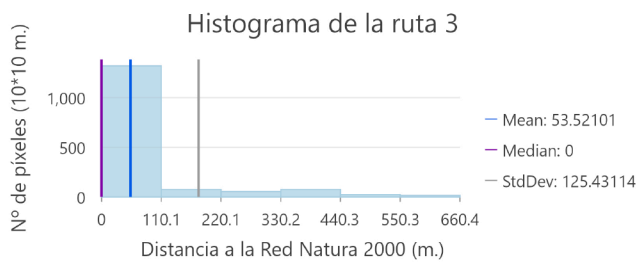
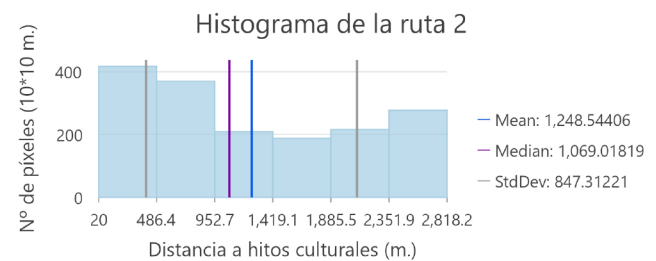
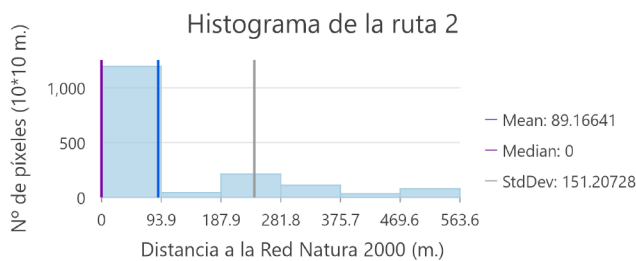
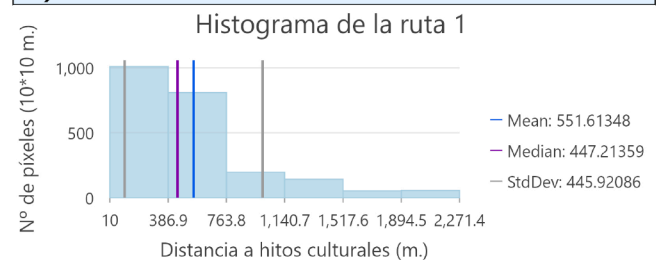
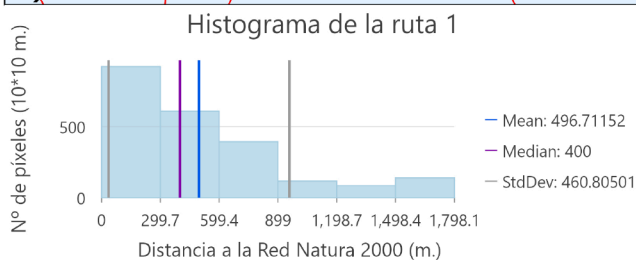
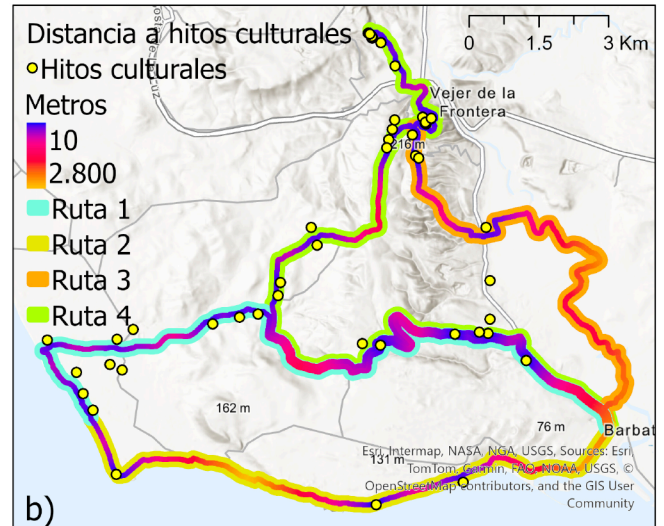
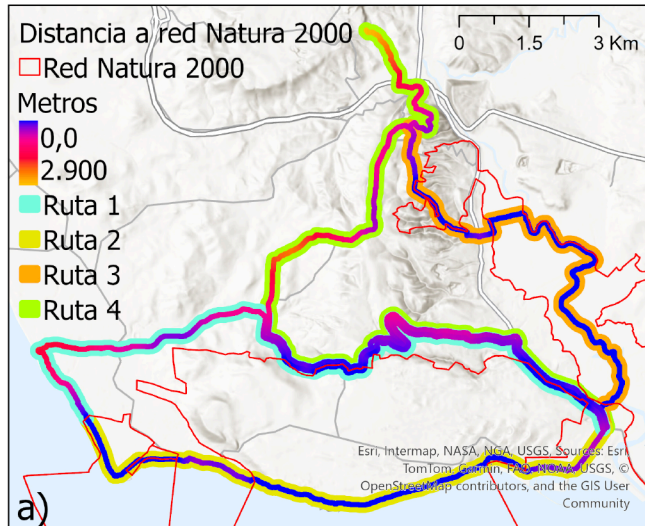
Specifies the method used to combine two or more membership data.

- And—The minimum of the fuzzy memberships from the input fuzzy rasters.
- Or—The maximum of the fuzzy memberships from the input rasters.
- Product—A decreasing function. Use this when the combination of multiple evidence is less important or smaller than any of the inputs alone.
- Sum—An increasing function. Use this when the combination of multiple evidence is more important or larger than any of the inputs alone.
- Gamma—The algebraic product of the fuzzy Sum and fuzzy Product, both raised to the power of gamma.

d) OK

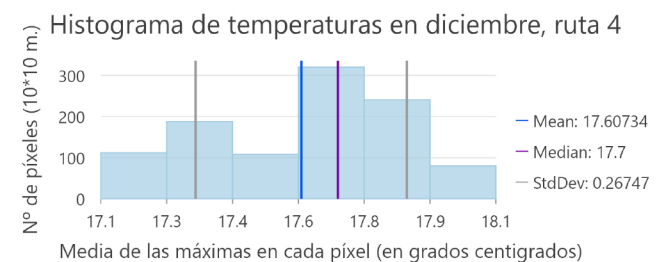
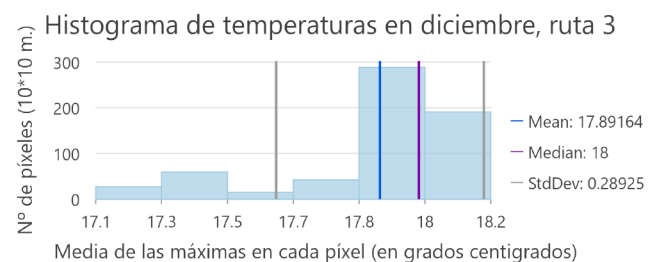
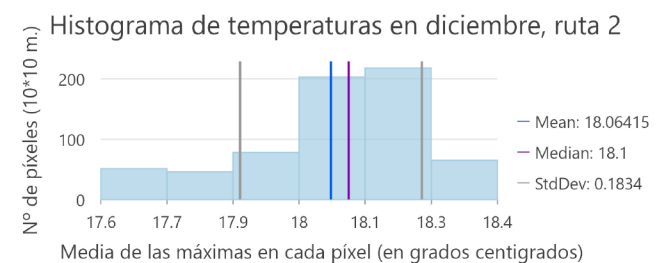
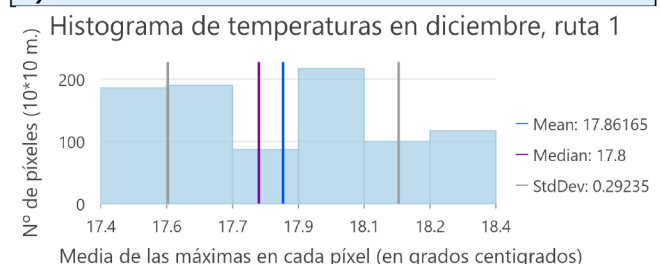
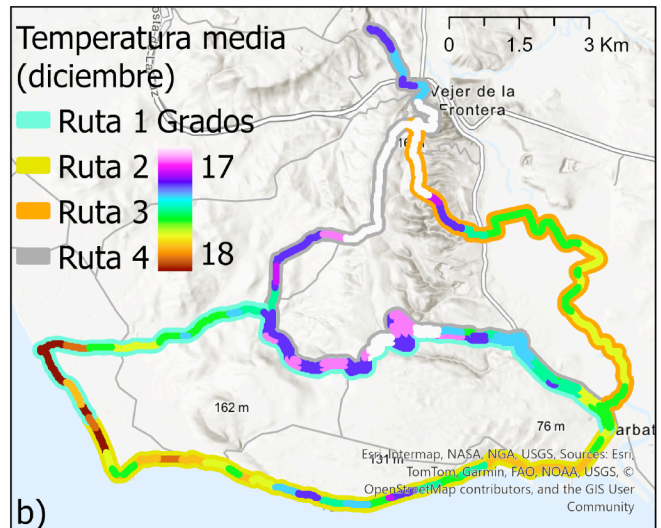
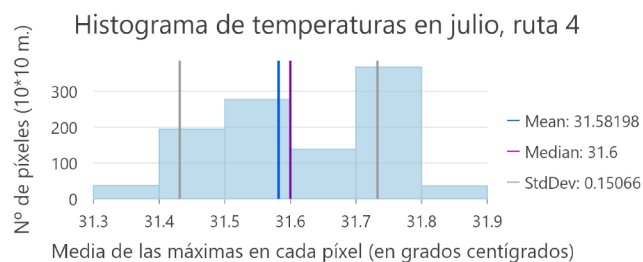
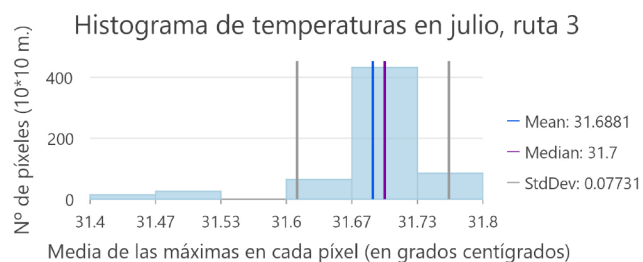
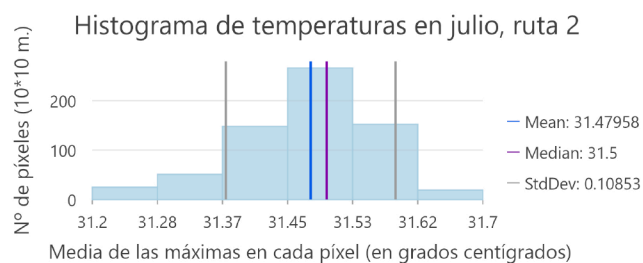
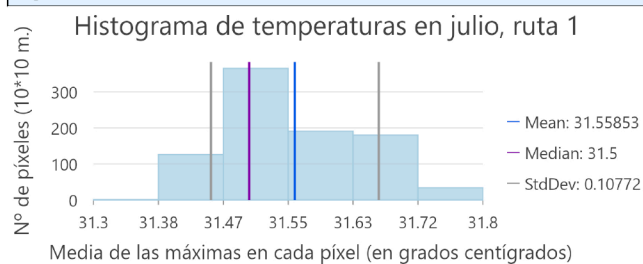
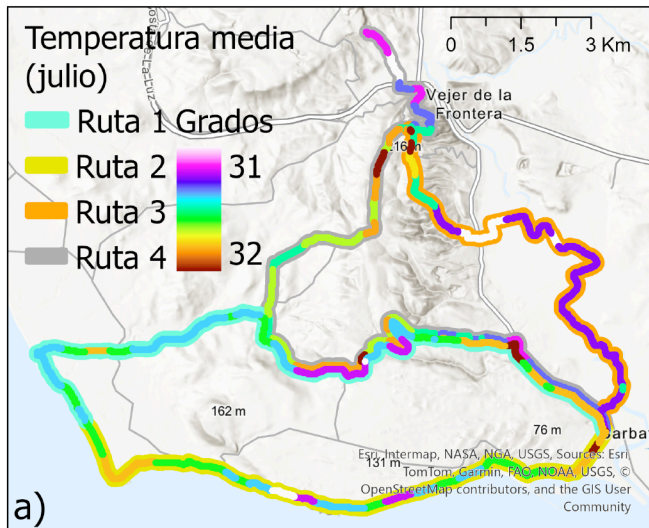


ANEXO 3. Histogramas de distancias a la Red Natura 2000 (a) y a los hitos culturales (b)





ANEXO 4. Histogramas de temperatura máxima media de los meses de julio (a) y diciembre (b)





ANEXO 5. Histogramas de clinometría

