

E.T.S. de Ingeniería Industrial, Informática
y de Telecomunicación

Aplicaciones IA en los Sistemas de Información
Geográfica



Máster Universitario
en Ingeniería Informática

Investigación e innovación

Jon Mikel Merino Ruiz

Jesús Villadangos Alonso

Pamplona, 16 de septiembre de 2022

upna
Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

Índice general

Introducción y objetivos	6
1.1. Introducción	6
1.2. Objetivos	6
Sistemas de Información Geográfica	8
2.1. Información Geográfica	8
2.1.1. Propiedades geométricas	9
2.1.2. Propiedades descriptivas	11
2.2. Componentes	11
2.3. Funciones	14
2.4. Datos espaciales	15
2.4.1. Representación digital	15
2.4.2. Gestión en los GIS	17
2.4.3. Fuentes	19
2.4.4. Formatos	21
2.5. Arquitectura	24
2.6. Herramientas	25
2.7. Aplicaciones	26
Sistema de Referencia de Coordenadas	27
3.1. Sistema de coordenadas geográficas	27

3.2.	Sistema de coordenadas proyectadas	29
3.2.1.	Proyección cilíndrica	30
3.2.2.	Proyección cónica	30
3.2.3.	Proyección acimutal	31
3.3.	Datums Geodésicos	34
3.3.1.	Elipsoide	34
3.3.2.	Geoide	35
3.3.3.	Punto fundamental	36
3.3.4.	Ejemplos	37
3.4.	Identificador de Referencia Espacial	37
3.5.	Transformación y conversión de coordenadas	38
Análisis espacial		39
4.1.	Estadística espacial	39
4.1.1.	Análisis de patrones de puntos	40
4.1.2.	Geoestadística	45
4.2.	Otras técnicas de análisis espacial vectorial	50
4.2.1.	Zonas buffer o de influencia	50
4.2.2.	Superposición espacial	51
Inteligencia Artificial Geoespacial		54
5.1.	Inteligencia Artificial	55
5.1.1.	Aprendizaje Automático	55
5.1.2.	Aprendizaje Profundo	56
5.2.	Inteligencia Artificial con datos espaciales	61
5.2.1.	Modelos de aprendizaje automático	61
5.2.2.	Modelos de aprendizaje profundo	66
Casos prácticos		73
6.1.	Centros de Atención Primaria por Municipios	73

6.1.1.	Captura de información geográfica sobre Municipios	73
6.1.2.	Añadir capas de Centros de Atención Primaria	77
6.1.3.	Resultado final	79
6.2.	Río Ebro	80
6.2.1.	Captura y procesado de información sobre ríos	80
6.2.2.	Descarga de imágenes aéreas	82
Conclusiones y líneas futuras		85
7.1.	Conclusiones	85
7.2.	Líneas futuras	86
Bibliografía		87

Índice de figuras

1.	Representaciones de datos geográficos a través de figuras geométricas	10
2.	Componentes GIS	11
3.	Mapa de Snow en su estudio sobre cólera	13
4.	Modelo Digital de Elevación	15
5.	Tipos de vectores	16
6.	Representación de los datos geográficos	17
7.	Arquitectura web GIS basada en la nube.	24
8.	Proyecciones ortográficas de la Tierra con paralelos y meridianos	27
9.	Familias de proyecciones cartográficas de La Tierra	29
10.	Mapa proyección cilíndrica	30
11.	Mapa proyección cónica	31
12.	Mapa proyección acimutal	32
13.	Proyección universal transversal de Mercator	32
14.	Comparación entre la superficie y el esferoide terrestre	34
15.	Comparación entre la superficie y el geoide terrestre	35
16.	Tipos de patrones de puntos	40
17.	Transición de patrón disperso a agrupado	41
18.	Centros medios demográficos en la zona del pirineo navarro	43
19.	Polígonos de Voronoi España	46
20.	Ponderaciones vecinos naturales	47
21.	Distancia Inversa Ponderada en mapa de elevación	48

22.	Triangulación de Delaunay	49
23.	Zonas buffer alrededor de objetos vectoriales	51
24.	Tipos de superposición espacial	52
25.	Modelo de un perceptrón	56
26.	Red Neuronal Artificial	57
27.	Convolución entre dos matrices	59
28.	Algoritmos de procesamiento de imágenes	60
29.	Clústeres municipios en base a la distancia	61
30.	Clústeres provincias en base a la población	62
31.	Hiperplano en el modelo SVM	64
32.	Función Kernel en el modelo SVM	64
33.	Segmentación imagen satelital mediante SVM	65
34.	Arquitectura modelo U-net	67
35.	Operaciones de convolución	68
36.	Cobertura terrestre	68
37.	R-CNN	69
38.	Fast R-CNN	70
39.	Faster R-CNN	71
40.	Detección de personas en imagen de dron	72
41.	Municipios Navarra visualizados en QGIS	75
42.	Municipios sin Centro de Atención Primaria	79
43.	Selección del río Ebro a su paso por Tudela	80
44.	Selección del río Ebro en distintos tramos	83

Introducción y objetivos

1.1. Introducción

Este trabajo se centra en el ámbito de la Inteligencia Artificial (IA), aplicado en los Sistemas de Información Geográfica (SIG). El objetivo es buscar la forma en la que la IA ayuda a mejorar el análisis de la información geográfica, favoreciendo así la toma de decisiones.

En estos últimos años ha habido importantes avances en el campo de la IA, ayudando en tareas como el reconocimiento de imágenes o la traducción de textos. La intersección de los SIG y la IA está creando enormes oportunidades que antes no eran posibles, por ejemplo, a aumentar el rendimiento de los cultivos a través de la agricultura de precisión, comprender los patrones delictivos y predecir cuándo llegará la próxima gran tormenta y estar mejor equipados para manejarla.

1.2. Objetivos

- Comprender las capacidades de los Sistemas de Información Geográfica y las formas de representación de los datos geográficos.
- Conocer los distintos tipos de Sistemas de Referencia de Coordenadas y las distintas formas de representación de la superficie terrestre.
- Conocer y entender modelos estadísticos para el análisis de datos geográficos.

- Conocer y entender modelos de IA aplicados en el ámbito geoespacial.
- Realizar una prueba de concepto con uno de los modelos aplicado a un caso real.

Palabras clave

- Información geográfica/geoespacial/espacial.
- Propiedades descriptivas/atributos.
- Capas/datos vectoriales.
- Capas/datos ráster.
- Modelo/clasificador.
- Características/propiedades/atributos.
- Clases/categorías/etiquetas.

Símbolos y abreviaciones

- «GIS» Geographical Information System.
- «CRS» Coordinate Reference System.
- «GeoAI» Geospatial Artificial Intelligence.
- «INSPIRE» Infraestructure for Spatial Information in Europe
- «ESRI» Environmental Systems Research Institute
- «OGC» Open Geospatial Consortium
- «WMS» Web Map Service
- «WFS» Web Feature Service
- «IDENA» Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra

Sistemas de Información Geográfica

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) o *Geographical Information System* (GIS), es un entorno para capturar, almacenar, gestionar y analizar datos geográficos. Lo cierto es que la definición de GIS es mucho más compleja que la anterior, además existen infinidad de definiciones sobre el término GIS, según la ciencia en la que se encuentre enmarcado o según funcionalidades, arquitectura, aplicaciones u objetivos que persigue. No vamos a entrar en los distintos puntos de vista que encontramos en la literatura sobre los GIS, pero sí que resulta interesante destacar la definición propuesta por el National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA): “Un SIG es un sistema de información compuesto por hardware, software y procedimientos para capturar, manejar, manipular, analizar, modelizar y representar datos georeferenciados, con el objetivo de resolver problemas de gestión y planificación”.

Antes de profundizar en cada parte de los GIS que aparece en la definición, vamos a definir lo que se entiende por Información Geográfica y las propiedades que presenta.

2.1. Información Geográfica

La información geográfica se define como “cualquier dato espacial, que de forma directa o indirecta, hace referencia a una localización o zona geográfica específica”, tal y como se establece en el artículo 3.2 de la Directiva INSPIRE [1]. En este sentido, podemos entender como información geográfica todos aquellos datos que hacen referencia a descripciones espaciales.

Según el Glosario multilingüe de ISO/TC 211, los términos “datos espaciales” y “datos geográficos” son sinónimos, y se definen como los datos que implícita o explícitamente se refieren a una localización relativa a La Tierra.

Por tanto, se pueden considerar como datos geográficos una dirección, un código postal o un punto definido mediante un sistema de coordenadas geográficas, entre otros.

Los datos geográficos presentan dos tipos de propiedades fundamentales: geométricas y descriptivas.

2.1.1. Propiedades geométricas

Las propiedades geométricas son aquellas que están vinculadas con la referencia espacial, conocida como “georeferenciación”. La georeferencia de un dato geográfico se define mediante su posición, la cual puede ser absoluta, sobre un sistema de coordenadas (x , y , z), o relativa, respecto a otros elementos del paisaje, con los que define relaciones topológicas. “La topología expresa las relaciones entre los objetos de forma cualitativa: si dos polígonos son colindantes (contigüidad), si uno está contenido en el otro (inclusión), si dos líneas están conectadas (conectividad)” [2].

Las posiciones pueden agruparse para localizar una región del espacio, a través de distintas figuras geométricas:

- Puntos: Los puntos representan objetos cuya dimensión es insignificante o nula para una determinada área. Por ejemplo, casas, torres de vigilancia, estaciones pluvimétricas. Los datos que refieren a objetos con dimensión de área escasa pero considerable extensión vertical también son tratados como puntos. Es el caso de los pozos de las perforaciones geológicas o mediciones subterráneas que aportan datos sísmicos.
- Líneas: Las líneas representan objetos cuya dimensión espacial es la longitud. Se definen mediante listas de pares de coordenadas (x , y) y pueden representar ríos, caminos, líneas del tendido eléctrico, etc.

- Áreas: Las superficies representan objetos que existen como superficies o áreas que pueden representarse como polígonos definidos como una serie cerrada de puntos de coordenadas espaciales. Por ejemplo, los municipios y los espacios naturales se representan mediante superficies.
- Volúmenes: Los volúmenes representan objetos tridimensionales, como por ejemplo son el relieve o las edificaciones.

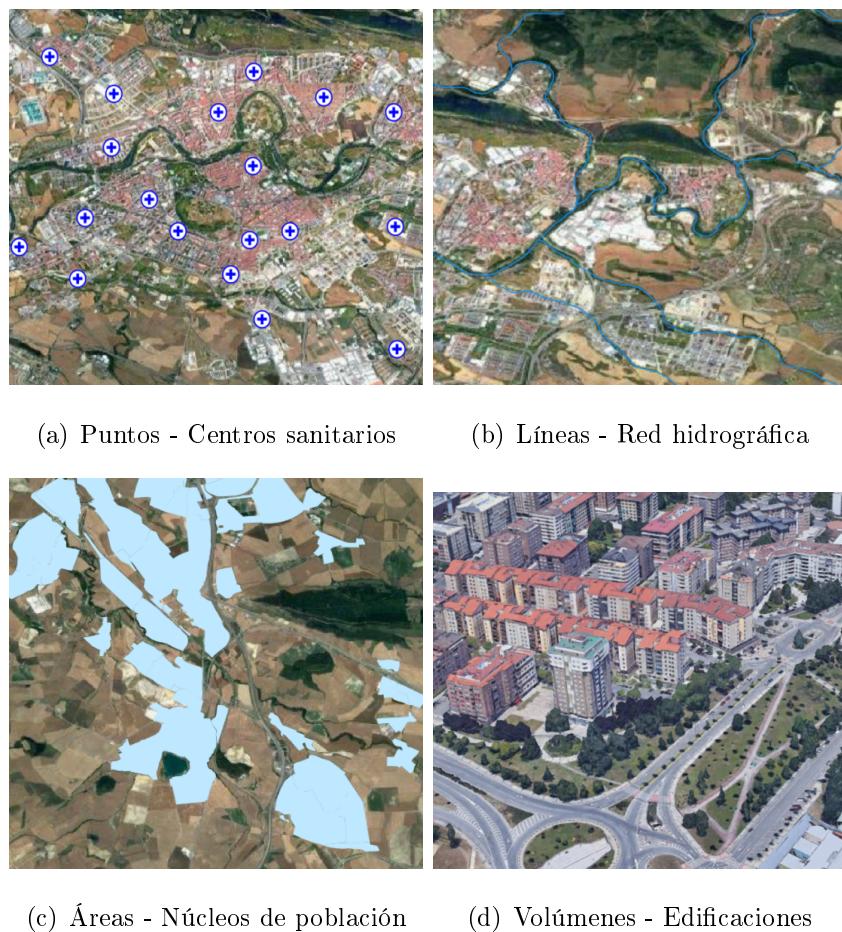


Figura 1: Representaciones de datos geográficos a través de figuras geométricas

La figura 1 muestra ejemplos concretos de representaciones geográficas visualizadas sobre el mapa.

2.1.2. Propiedades descriptivas

Además de las propiedades geométricas, la información geográfica está compuesta por propiedades descriptivas. Estas propiedades constan de información cuantitativa/cualitativa que aporta un valor diferenciado entre los datos. Esta información se define en forma de atributos, que pueden ser discretos o continuos.

- Atributos discretos: el conjunto de valores que puede tomar el atributo asociado al espacio geográfico es discreto, como por ejemplo el tipo de cultivo o la capacidad de un canal.
- Atributos continuos: el valor asociado a los puntos del espacio puede variar de modo gradual a lo largo del espacio geográfico, como por ejemplo la salinidad del suelo, la temperatura o la presión atmosférica.

En definitiva, los objetivos que persiguen los GIS son el reconocimiento de las relaciones topológicas y geométricas que existen entre los elementos geográficos, y el manejo de las características temáticas (atributos).

2.2. Componentes

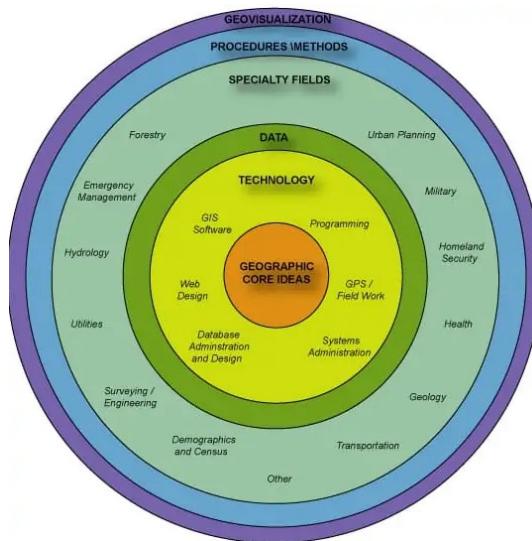


Figura 2: Componentes GIS

Los GIS han evolucionado a lo largo del tiempo, de modo que la interpretación del concepto ha ido aumentando en dimensión y complejidad. Por ello, es importante clasificar sus componentes según su importancia. En [3], se proponen 6 componentes de los GIS, los cuales podemos observar en la figura 2 en forma de anillos concéntricos.

- Geographic Core Ideas

El núcleo de los GIS es la teoría en la que están basados estos sistemas, como por ejemplo la geografía, topología, geodesia, etc. A partir de estos conocimientos, surgen problemáticas o planteamientos geográficos que se quieren resolver a partir del análisis de la información geográfica.

- Tecnología

El anillo que envuelve el core de los GIS, corresponde a todas las necesidades tecnológicas que estos requieren. Agrupa tanto software como hardware, incluyéndose tareas administrativas para la gestión de los GIS y de los Sistemas Gestores de Bases de Datos que nutren de datos a los GIS. En la sección 2.6, veremos algunos de los productos GIS más populares.

- Datos

En este componente se incluye cualquier información geográfica, detallada en la sección 2.1. Más adelante, en la sección 2.4, veremos la forma en la que los GIS gestionan los datos. En estos últimos años, el manejo de los datos ha cobrado más importancia que el software propio de GIS, debido al gran volumen de datos que se generan. Existe un exceso de datos provenientes, entre otros, de los dispositivos IoT, que recopilan datos constantemente. La mayoría de esta información está georeferenciada, pero no está estructurada. Por otro lado, existen sistemas de observación terrestre, como sensores, satélites o vuelos digitales. Esta información si se encuentra estructurada, ya que es capturada y documentada por distintos organismos e instituciones (en la sección 2.4 comentaremos algunas de ellas).

- Especialidades

En el componente de Especialidades, se incluyen todos aquellos campos de la geografía o que hacen uso de ella para resolver cuestiones relacionadas con una profesión o sector.



Figura 3: Mapa de Snow en su estudio sobre cólera

Uno de los campos que aparece en la figura 3, es el campo de la salud, en el que se incluye el trabajo de Dr. John Snow. de 1854, con el que consiguió identificar el origen de un brote de cólera en Londres, el cual se encontraba en una de las fuentes de la ciudad. Para ello, creó el mapa de la figura, a partir de datos de estudio, en el que se observa un patrón claro que nadie había observado todavía.

- Procedimientos/Métodos

Este componente está referido a las distintas formas de trabajo de cada campo del componente anterior. Los equipos que trabajen con GIS, deben planificar el uso de los datos espaciales, la tecnología que mejor se ajuste a ellos y la forma de presentar los resultados al usuario final.

- Geovisualización

Resulta verdaderamente importante la presentación de datos al usuario final, ya que nos va a permitir que el análisis de los datos nos sirva en la toma de decisiones. Esta representación del espacio y el tiempo puede tomar la forma de mapas, gráficos, diagramas, animaciones y simulaciones.

2.3. Funciones

La potencia de un GIS está en las utilidades o análisis que se pueden realizar con la información. Las más básicas pueden ser:

- Captura

El proceso de captura de la información geográfica se basa en la digitalización de los datos, es decir, pasar los datos a una forma analítica. Hay muchas formas diferentes de recopilar datos GIS. Por ejemplo, a través de sistemas LiDAR , drones , GPS o satélites.

- Almacenamiento

En la mayoría de casos se realiza un preprocesamiento de los datos capturados para su correcta estructuración.

- Consulta

La información capturada y almacenada debe poder ser gestionada por el GIS, permitiendo realizar búsquedas temáticas, espaciales y con capacidad de selección multicondicionadas para su posterior análisis.

- Análisis

Uso de métodos espaciales y estadísticos para analizar tanto las propiedades geométricas como las descriptivas de la información geográfica (dichos métodos se explicarán más detalladamente en el capítulo 3.5).

Esta función es la específica de los GIS y es su elemento característico.

- Visualización de resultados

Presentación de los datos es en su proyección sobre el espacio bidimensional o tridimensional, definido mediante coordenadas cartesianas.

2.4. Datos espaciales

2.4.1. Representación digital

Los datos geográficos se representan en forma de capas de información. En los GIS, las capas definen los distintos formatos con los que se representan los datos geográficos, en concreto, especifican qué características siguen y con qué forma se estructuran.

En función de la tipología de los datos, podemos identificar dos tipos de capas:

- Capa ráster

Los datos están dispuestos en una malla rectangular de celdas, cuadrados o píxeles.

Cada píxel dentro de un ráster tiene un valor, como color, altura, temperatura, velocidad del viento u otras medidas. Algunos ejemplos de capas ráster lo vemos en las imágenes satélite, en dónde cada pixel tiene un color asociado, o en los mapas de elevación, dónde cada pixel está representado por una altura específica.

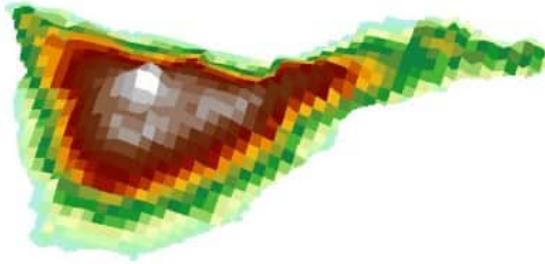


Figura 4: Modelo Digital de Elevación

En la figura 4 podemos observar un modelo digital de elevación en dónde los pixeles se componen de un color en base a la altitud del terreno.

- Capa vectorial

Las capas vectoriales, como su propio nombre indica, están formadas por datos vectoriales, los cuales representan geometrías en el espacio.

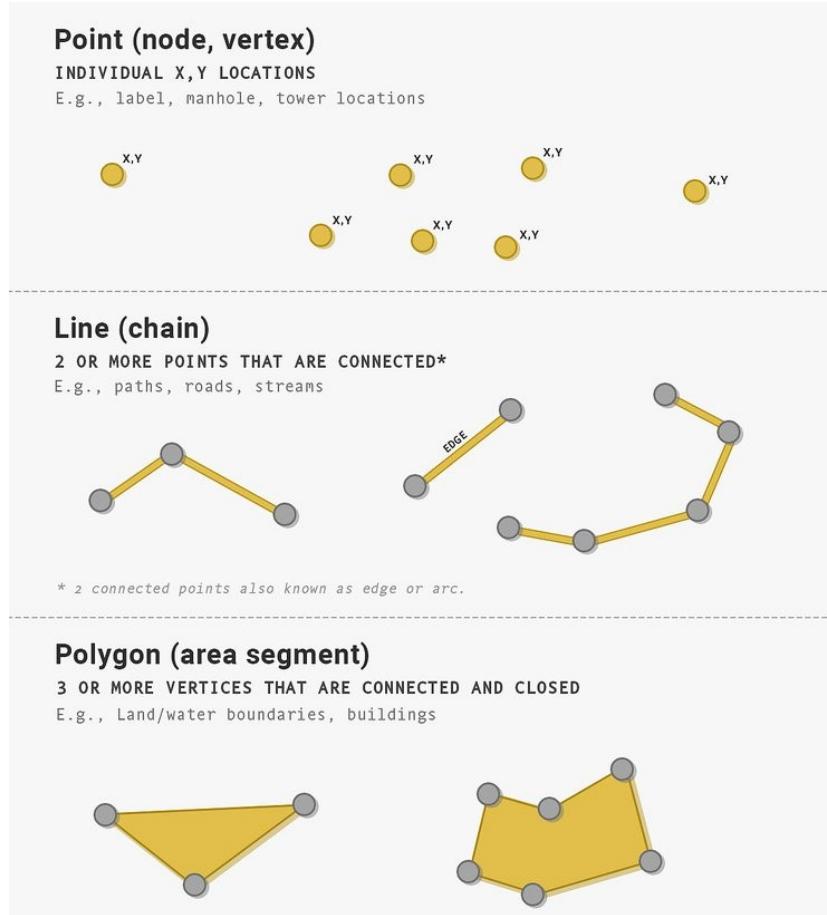
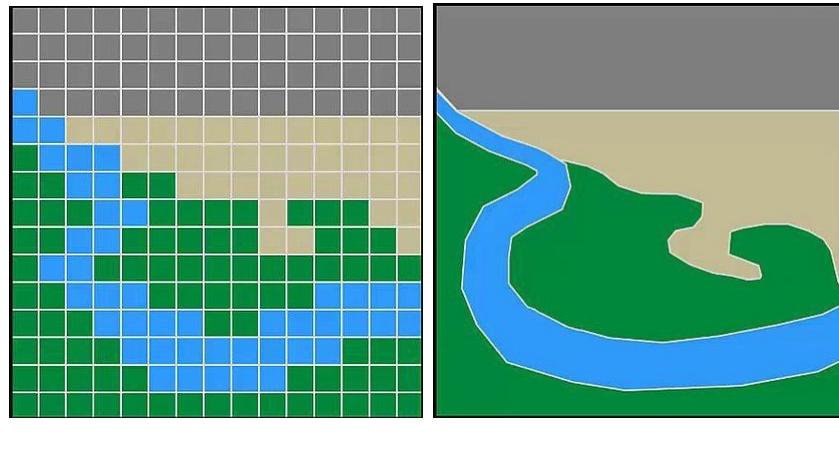


Figura 5: Tipos de vectores

Tal y como se muestra en la figura 5, las tres geometrías principales son los puntos, las líneas y los polígonos (líneas conectadas que encierran un área en su interior). Podemos usar vectores para presentar características y propiedades en la superficie de La Tierra. Como por ejemplo, asociando la dirección como atributo de los centros sanitarios, mostrados en la figura 1(a), los cuales se representan mediante puntos.



(a) Capa ráster

(b) Capa vectorial

Figura 6: Representación de los datos geográficos

Como hemos visto en los puntos anteriores, la diferencia principal entre las capas, es la forma en la que representan los datos geográficos, cuya diferencia queda expuesta en el ejemplo de la figura 6.

Cada representación de los datos geográficos tienen sus ventajas e inconvenientes, por ejemplo, las capas ráster son adecuadas para modelar aspectos del medio muy variables, en cambio, las capas vectoriales son más adecuadas para modelizar aspectos poco variables, generalmente cualitativos. Por otro lado, las capas vectoriales permiten definir los límites entre distintos objetos de forma más precisa, en cambio, las capas ráster presentan límites basados en el propio tamaño de píxel y tienen ciertas dificultades para desarrollar análisis espaciales.

2.4.2. Gestión en los GIS

El GIS incorpora un gestor de capas que permite al usuario ordenar, añadir y eliminar capas, de forma que permite construir mapas dinámicos. Además, permite al usuario almacenar de forma permanente configuraciones interesantes que pueden ser recuperadas más adelante. También permite realizar análisis más profundos y complejos que con otros sistemas. Por ello, podemos representar situaciones reales o escenarios simulados

de gran utilidad, como por ejemplo, para analizar la distribución y el índice de pobreza de un país a lo largo del tiempo.

El camino que nos permite modelar problemáticas que tenemos en la realidad a través de los GIS, pasa por la construcción de los siguientes modelos:

- **Modelo geográfico**

El modelo geográfico es el modelo conceptual de la realidad geográfica, es decir, el fenómeno del que partimos. En el ejemplo de la pobreza de un determinado país, necesitamos representar un modelo conceptual en el que, por ejemplo, las ciudades pueden ser las unidades conceptuales objeto de estudio. Cada una de ellas con una serie de propiedades descriptivas, y que se relacionan geográficamente entre sí por sus propiedades geométricas, cuya representación tenemos que modelar.

- **Modelo de representación**

El modelo de representación es la forma de reducir a un conjunto finito de elementos el modelo geográfico definido anteriormente. Por ejemplo, una vez definido a las ciudades como objeto de estudio, podemos representarlas como puntos en el espacio total, en este caso el territorio de un país. La distancia entre puntos puede representar la distancia real que existe entre las ciudades o/y el tamaño de los puntos puede ser proporcional al número de habitantes que viven en esa ciudad. En otros estudios nos puede interesar representar las ciudades como polígonos, por ejemplo para hacer explícita la superficie de esa ciudad.

- **Modelo de almacenamiento**

El modelo de almacenamiento es un esquema que define la forma de guardar los distintos elementos del modelo de representación. Por ejemplo, podemos almacenar las ciudades como imágenes comprimidas y sus características almacenadas en una hoja de Excel.

2.4.3. Fuentes

Antes de entrar en los distintos servicios que permiten la captura de información geográfica, es necesario conocer la legislación vigente a nivel europeo para la exposición de este tipo de información. La Infraestructura de Información Espacial en Europa o *Infrastructure for Spatial Information in Europe* (INSPIRE), ha sido desarrollada por la Comisión Europea con el propósito de hacer disponible información geográfica relevante, concertada y de calidad, de forma que se permita la formulación, implementación, monitorización y evaluación de las políticas de impacto o de dimensión territorial. Dicho funcionamiento se recoge en la Directiva [1] del Parlamento Europeo. Algunos de los servicios que en ella se especifican, están basado en estándares *Open Geospatial Consortium* (OGC) [4]. El OGC es un consorcio internacional formado por más de 500 entidades, entre las cuales se encuentran empresas, agencias gubernamentales, centros de investigación y universidades, con el objetivo de exponer servicios de información geoespacial de forma fiable, accesible, interoperable y reutilizable.

Por lo tanto, las fuentes de datos espaciales comentadas a continuación deben responder a los requisitos definidos por la Directiva [1].

A nivel nacional, algunos Ministerios facilitan el acceso a los datos espaciales que generan.

- El Instituto Geográfico Nacional (IGN), institución configurada como una Dirección General del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, pone a disposición datos geográficos entre los que se encuentran imágenes aéreas, bases cartográficas o modelos digitales de elevación, entre otros. Expone los datos geográficos a través del portal web SignA [5] (Sistema de Información Geográfica Nacional), para su visualización, análisis y consulta, de manera libre y gratuita. Estos datos también pueden ser consultados mediante un servicios web a través de estándares OGC, algunos de los cuales comentaremos en la siguiente selección (Arquitectura). Por ejemplo, podemos obtener información de las redes de

transporte viario (urbanos e interurbanos): red de carreras, red ferroviaria, vías navegables y vías aéreas.

- El Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) expone datos geográficos a través del portal web GeoPortal [6]. También exponen información mediante el cumplimiento de los estándares OGS. La información expuesta está clasificada en las siguientes áreas de actividad: “Agua”, “Biodiversidad y Bosques”, “Calidad y evaluación ambiental”, “Costas y Medio Marino” y “Cambio Climático”. Por ejemplo, podemos obtener una capa con la Red Hidrográfica de canales principales de España.
- El Ministerio de Fomento cuenta con una entidad pública empresarial adscrita a él, llamada ENAIRE, encargada de gestionar la navegación aérea en España y el Sahara Occidental. ENAIRE es principal proveedor de información aeronáutica en España, la cual expone a través del portal web “ENAIRE Planea”, con el que se puede gestionar y planificar trabajos aéreos, vuelos experimentales y actividades especiales en espacio aéreo español. También dispone de la aplicación web “ENAIRE Drones” [7], en la que se muestra zonas de relevancia para el vuelo de drones, como aeropuertos, helipuertos, bases militares y Espacios Naturales Protegidos y Zonas de especial protección para aves (ENP /ZEPA). Además, incluye alertas y avisos de la AIP (Publicación de Información Aeronáutica), los NOTAMs, avisos temporales sobre una zona determinada en la que se está llevando a cabo algún tipo de vuelo de carácter temporal.

En Navarra, la Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra (IDENA) corresponde a una parte fundamental en el desarrollo del Sistema de Información Territorial de Navarra (SITNA), red de recursos de información referidos al territorio de la Comunidad Foral de Navarra. IDENA, al igual que el resto de proveedores de información geográfica, cuenta con un portal web [8] para visualizar la información que ofrece. Expone información geográfica de todo tipo: catastral, municipal, hidrográfica, meteorológica, cartográfica, etc.

Al igual que el resto de visores web comentados, en [8] se pueden realizar distintas acciones con las capas:

- Elegir un mapa de fondo entre una gran variedad, en el que se puede superponer capas con distintas temáticas y definir su nivel de transparencia y color. Además cada capa se puede activar o desactivar, para que se muestre o no en el mapa.
- Dibujar puntos, líneas o polígonos y medir su longitud, perímetro, área, etc., muy útil para el diseño de rutas y para planificar de manera ágil trabajos en campo.
- Añadir información en forma de atributos de la información geográfica publicada.
- Obtener coordenadas al posicionar el cursor del ratón sobre el mapa.
- Descargar información en los formatos más utilizados, algunos de ellos explicados a continuación.
- Compartir mapas o objetos seleccionados de una o varias capas activas, así como dibujos o atributos añadidos.

2.4.4. Formatos

Existen muchos formatos de datos espaciales, capaces de almacenar datos vectoriales, datos ráster o ambos. Algunos de los más destacados son:

- Shapefile

Shapefile es un formato desarrollado por la empresa ESRI para datos vectoriales. Es el formato más extendido y popular entre la comunidad GIS, aunque presenta bastantes inconvenientes. Almacena varios archivos que los GIS leen como si fuera uno único. Los tres archivos básicos que componen un shapefile terminan en “.shp” (almacena las propiedades geométricas), “.shx” (almacena el índice de las propiedades geométricas) y “.dbf” (almacena los atributos). Entre otros inconvenientes, el tamaño del archivo .dbf no puede superar los 2 GB y los nombres de campo no pueden superar los 10 caracteres ni contener ciertos caracteres restringidos.

A pesar de sus inconvenientes, su uso está tan extendido debido a ser el primer formato de datos espaciales de uso comercial.

- **GeoJSON**

GeoJSON es uno de los formatos abiertos más utilizados para distribuir datos geográficos vectoriales. Está basado en el formato JSON, ampliamente utilizado en el web, ya que está optimizado para la interpretación en las máquinas virtuales Javascript, que es el lenguaje nativo de los navegadores web. Almacena las coordenadas de las figuras geométricas en formato texto.

- **GeoPackage**

GeoPackage es otro formato abierto, pero este es universal, es decir, se utiliza para almacenar tanto datos vectoriales como ráster. Está construido sobre la base de datos SQLite, en concreto corresponde a un contenedor de esta. Los archivos se almacenan en formato binario y con la extensión “.gpkg”. GeoPackage se ha convertido en la alternativa al Shapefile, en algunas herramientas GIS ya es el formato por defecto en el que se exportan los datos.

- **XML / GML**

El *Extensible Markup Language* (XML) es un formato de texto simple para datos vectoriales, muy flexible derivado del *Standard Generalized Markup Language* (SGML), definido en la ISO 8879. Originalmente, se diseñó para afrontar los retos de la edición electrónica. El *Geography Markup Language* (GML) es un estándar de codificación basado en XML, desarrollado por el OGS. GML sirve para modelar, transportar y almacenar información geográfica, tanto sus propiedades geométricas como descriptivas.

- **KML / KMZ**

El *Keyhole Markup Language* (KML) es un formato abierto para datos vectoriales, basado en la sintaxis del formato XML y que utiliza como referencia el estándar GML. Originalmente desarrollado para ser utilizado en la herramienta

“Google Earth”, pero desde el año 2008 es estándar de la OGC. Guarda los archivos con la extensión “.kml”, aunque suelen distribuirse comprimidos con la extensión “.kmz”, que además pueden guardar imágenes sobreuestas y otra información asociada.

- CSV / GeoCSV

El *Comma-separated values* (CSV) es un formato de datos vectoriales, representados en forma de tabla. Los datos se almacenan como texto separado por comas, en donde cada fila se guarda los pares de coordenadas correspondientes a las distintas figuras geométricas de la capa. Guarda los archivos con la extensión “.csv”. Existe la extensión opcional para especificar que el formato almacena figuras geométricas (GeoCSV). Tiene dos variantes, Punto X/Y o WKT. La variante de Punto X/Y es igual a la descrita para el formato CSV, y tiene la limitación de almacenar únicamente puntos. Por ejemplo, podemos tener la fila “-1,6152; 42.6432” que almacena las coordenadas (Longitud y Latitud) de un punto. Por otro lado, tenemos que el *Well Known Text* (WKT) es una representación de datos vectoriales con una sintaxis ASCII estandarizada. Esta codificación de objetos espaciales vectoriales se emplea en la variante WKT. Por ejemplo, para representar el punto del ejemplo anterior, tendríamos la fila “POINT(-1,6152 42.6432)”.

- GeoTIFF

GeoTIFF es uno de los formatos más populares para almacenar datos ráster. Constituye una modificación al archivo de imágenes TIFF, pero que le permite guardar datos geográficos. Guarda los archivos con la extensión “.tif”, además debe ir acompañado por el *world file*, que tiene la extensión “.tfw”, y sirve para referenciar geográficamente al ráster. El GeoTIFF se ha convertido en un archivo estándar de imagen en los GIS y en aplicaciones de teledetección por satélite.

- NetCDF

El *Network Common Data Form* (NetCDF) es uno de los formatos abiertos más utilizado para datos ráster, especialmente para datos climáticos. Almacena varia-

bles multidimensionales, como por ejemplo la temperatura, la precipitación o la velocidad del viento en el tiempo. Dependiendo de la fuente de los datos, estos archivos pueden llegar muy pesados. A pesar de ello, este formato resulta ágil de manejar en comparación con el resto. Los archivos presentan la extensión “.nc”.

2.5. Arquitectura

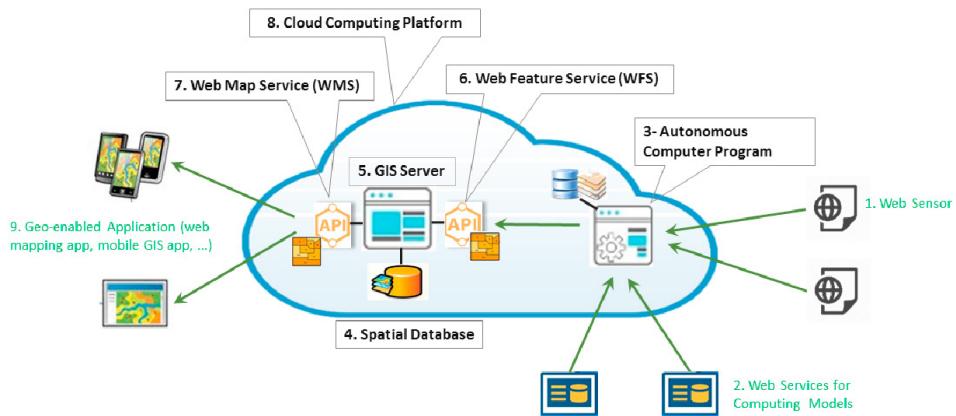


Figura 7: Arquitectura web GIS basada en la nube.

En la figura 7 se muestra un esquema con los distintos componentes que forman la arquitectura de un GIS basado en la nube. En concreto, vemos la infraestructura empleada para el despliegue de los servicios GIS y su interacción con los usuarios de tales servicios. Los usuarios acceden en tiempo real a los servicios GIS a través de Internet por medio de un Servicio Web o API (puntos 1 y 2). También el servicio puede ser consumido por una aplicación web (punto 3) para acceder a sus datos o funcionalidad. La propia plataforma (punto 8) contiene una aplicación web que se conecta al servidor GIS (punto 5) para recibir y recopilar datos geográficos. La aplicación permite manipular estos datos, es decir, permite realizar operaciones CRUD (*Create, Read, Update, Delete*) con la base de datos espaciales (punto 4). Los datos son el núcleo de cualquier GIS, por ello, la BBDD espacial debe mantener los datos disponibles y accesibles en todo momento. Para ello, es necesario que permita el acceso a los datos en tiempo real, ya

que los datos son capturados en tiempo real y se perdería la coherencia en determinadas aplicaciones. La BBDD espacial también debe ser editable y replicable, para mantener la integridad de los datos. Por último, en las arquitecturas GIS basadas en la nube, la BBDD espacial debe estar integrada en la infraestructura cloud en la que están el resto de servicios.

El servidor GIS expone la información a través de distintos estándares de servicios web (estándares OGC), servicios que cumplen con una serie de normas de intercambio de información desarrolladas por el Open Geospatial Consortium, entre los cuales destacan el WMS, Servicio de Mapas Web (punto 7), y el WFS, Servicio de Objetos Espaciales (punto 6). El protocolo WMS permite servir imágenes georeferenciadas a través de internet, es decir, permite obtener mapas y capas en formato imagen. En cambio, el protocolo WFS permite realizar peticiones al servidor sobre elementos u objetos (features) geográficos individualizados, de modo que podremos acceder no sólo a las geometrías de los elementos sino también a los atributos de los mismos.

2.6. Herramientas

En los últimos años han aparecido en el mercado numerosas herramientas de desarrollo de GIS, que facilitan el desarrollo de aplicaciones SIG. Estas herramientas se caracterizan por ofrecer a los desarrolladores las funcionalidades básicas para la gestión y almacenamiento de información, junto con ciertas facilidades para el desarrollo de interfaces de captura y consulta de los datos.

Entre las herramientas que actualmente lideran el mercado del desarrollo GIS, destacan *QGIS* y *ArcGIS*.

QGIS es el GIS líder de código abierto para escritorio, licenciado bajo GNU - General Public License y desarrollado por Open Source Geospatial Foundation (OSGeo), organización sin ánimo de lucro centrada en el ámbito de la tecnología geoespacial, con filosofía de software libre y desarrollo participativo. Por ello, *QGIS* cuenta con una gran

comunidad que contribuye en forma de corrección de errores, implementación de plugins y en menor medida en aportaciones de documentación.

Por otro lado, *ArcGIS* agrupa un conjunto de aplicaciones GIS de pago, comercializadas por *ESRI* (Environmental Systems Research Institute), empresa norteamericana líder del sector. A diferencia de *QGIS*, presenta una documentación muy detallada y además, engloba una familia de aplicaciones online (*ArcGIS Server*), permitiendo crear y compartir mapas web interactivos, lo que facilita el trabajo colaborativo con este tipo de información.

QGIS resulta una opción más interesante cuando nos interesa trabajar con distintos sistemas operativos, ya se puede instalar en mac, linux o windows, en cambio *ArcGIS* sólo se puede instalar en windows, según la especificación oficial de requisitos de instalación [9]. *QGIS* también permite disponer de un conjunto amplio de herramientas y plugins de forma gratuita, sin necesidad de licencia, debido a su condición de software libre.

2.7. Aplicaciones

Existen numerosas formas en las que los GIS son utilizados en la industria. Algunos ejemplos son:

- Los equipos de respuesta a emergencias para definir movimientos en situaciones de desastres naturales.
- Las autoridades para descubrir cualquier humedal potencial que deba protegerse de los efectos nocivos provocados por la contaminación.
- Las empresas para elegir una ubicación de mercado estratégica que aún no haya sido saturada por otros competidores.
- El personal sanitario para predecir cualquier posible propagación de enfermedades y pandemias que siguen los mismos patrones de propagación.

Sistema de Referencia de Coordenadas

Un Sistema de Referencia de Coordenadas (SRC) o *Coordinate Reference System* (CRS), es un sistema que determina únicamente la posición de cualquier punto de la superficie terrestre, lo cual constituye una de las principales características de los GIS. Para ello, se emplean tuplas de 3 números denominados coordenadas, estas pueden ser geográficas (latitud, longitud, altura) o proyectadas (X, Y, Z). Según el tipo de coordenadas, tenemos dos sistemas de referencia: Sistema de coordenadas geográficas y sistema de coordenadas proyectadas.

3.1. Sistema de coordenadas geográficas

Un Sistema de Coordenadas Geográficas (SCG) o *Geographic Coordinate System* (GCS), utiliza la superficie esférica tridimensional de La Tierra para definir lugares reales de la misma. Se apoya en los Polos y en el Ecuador para construir una red geográfica, formada por paralelos y meridianos.

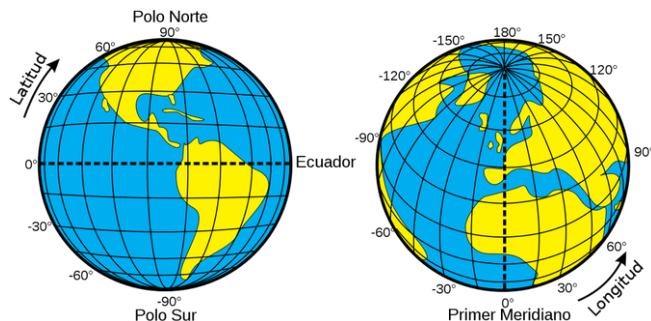


Figura 8: Proyecciones ortográficas de la Tierra con paralelos y meridianos

La figura 8 muestra dos proyecciones distintas del GCS. En ambas, las líneas horizontales o paralelos presentan el mismo valor de latitud, y las líneas verticales o meridianos presentan el mismo valor de longitud. El globo terráqueo de la izquierda corresponde a una proyección ecuatorial, en la que podemos observar algunos valores de latitud. El ecuador es el paralelo 0° y divide el globo en hemisferios norte y sur, teniendo el polo norte una latitud 90° N y el polo sur una latitud 90° S. A la derecha se observa una proyección oblicua, en la que se muestran algunos valores de la longitud. Podemos observar que a partir de un meridiano base se miden las longitudes. Para la mayoría de los GCS, el meridiano base es la longitud que atraviesa Greenwich, situado al sureste de Londres. Entonces, el Primer Meridiano es el meridiano 0° y los siguientes meridianos se miden desde 0 hasta 180 grados al este o al oeste del primer meridiano. Los valores de longitud hacia el oeste del primer meridiano tienen valores negativos, para su uso en aplicaciones de cartografía digital.

Para hacer referencia a un punto en la superficie de La Tierra, se utilizan sus valores de latitud, longitud y altitud.

- La latitud es el ángulo entre el plano ecuatorial y la línea que pasa por el punto y el centro de la Tierra.
- La longitud es el ángulo entre el meridiano de referencia y el meridiano que pasa por el punto.
- La altitud es la distancia vertical que existe entre cualquier punto de la Tierra en relación al nivel del mar.

Existen diferentes formatos y notaciones para definir las coordenadas, las cuales se exponen en la siguiente tabla:

En la tabla 3.1 el grado-signo puede ir delante o detrás del valor de la coordenada.

Notación	Latitud	Longitud	Ejemplo
DD (Grados decimales)	[+ -] DD,dddd	[+ -] DDD,dddd	40.76, -73.984
	DD,dddd [N S]	DDD,dddd [E O]	40.76 N, 73.984 O
DM (Grados:Minutos)	[+ -] DD° MM.mm'm'	[+ -] DDD° MM.mm'm'	40° 45.6', -73° 59.04'
	DD° MM.mm'm' [N S]	DDD° MM.mm'm' [E O]	40° 45.6' N, 73° 59.04' O
DMS (Grados:Minutos:Segundos)	[+ -] DD° MM' SS,sss"	[+ -] DDD° MM' SS,sss"	40° 45' 36", -73° 59' 2.4"
	[N S] DD° MM' SS,sss"	[E O] DD° MM' SS,sss"	40° 45' 36" N, 73° 59' 2.4" O

Tabla 3.1: Tipos de notaciones de coordenadas

3.2. Sistema de coordenadas proyectadas

A diferencia de los GCS, los Sistema de Coordenadas Proyectadas (SCP) o *Projected Coordinate System* (PCS), localizan ubicaciones en una superficie plana de La Tierra a través de proyecciones cartográficas, las cuales crean una representación métrica bidimensional de la superficie tridimensional de La Tierra. Por lo tanto, las coordenadas de longitud y latitud pasan a ser coordenadas cartesianas (x e y), en un sistema con unidades métricas (pies, metros, kilómetros, pulgadas, etc.) Estas representaciones planas de la esfera terrestre son más conocidas como mapas. Para su elaboración, los cartógrafos emplean distintos tipos de proyecciones cartográficas, agrupadas en tres familias principales, que resultan de rodear el globo terráqueo con superficies cilíndricas, cónicas o planas.

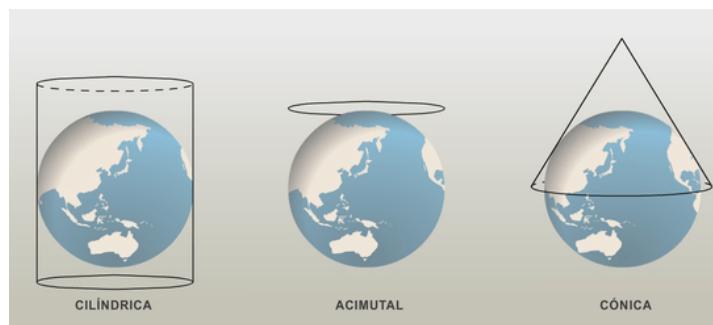


Figura 9: Familias de proyecciones cartográficas de La Tierra

La figura 9 muestra los esquemas de los tres tipos de proyecciones cartográficas básicas: cilíndricas, cónicas y acimutales.

3.2.1. Proyección cilíndrica

Las proyecciones cilíndricas usan un cilindro tangente a la esfera terrestre, de tal manera que el cilindro contiene al globo terráqueo manteniendo el contacto con el Ecuador. La superficie terrestre se proyecta sobre el cilindro a partir de un foco de luz que se encuentra en el centro de La Tierra.



Figura 10: Mapa proyección cilíndrica

La figura 10 muestra el mapa resultante de la proyección cilíndrica, el cuál presenta una red de paralelos y meridianos perpendiculares. La deformación de la escala es proporcional a la distancia con el Ecuador, donde se conserva la escala. A pesar de esta deformación, esta representación resulta útil en ciertos campos como el de la navegación, debido principalmente a la sencillez que aporta la perpendicularidad entre meridianos y paralelos. Es una de las proyecciones más utilizadas, aunque por lo general en forma modificada, debido a las grandes distorsiones que ofrece en las zonas de latitud elevada, lo que impide apreciar a las regiones polares en su verdadera proporción.

3.2.2. Proyección cónica

Las proyecciones cónicas usan un cono tangente a la esfera terrestre, situando el vértice en el eje que une los dos polos, de tal manera que el cono se sitúa encima de La Tierra. La superficie terrestre se proyecta sobre el cono a partir de un foco de luz situado en el

vértice del mismo, es decir, en uno de los dos polos.



Figura 11: Mapa proyección cónica

La figura 11 muestra el mapa resultante de la proyección cónica, el cuál presenta los meridianos como líneas rectas que parten del polo, mientras que los paralelos son circunferencias concéntricas con centro el polo. Los paralelos o paralelo que mantienen el contacto con el cono, se denominan paralelos de referencia, y en ellos se conserva la escala, aumentando la deformación a medida que nos alejamos. Por lo tanto, esta representación resulta útil para aquellos países que se encuentran en las regiones de latitudes medias.

3.2.3. Proyección acimutal

Las proyecciones acimutales usan un plano tangente a un punto de la superficie terrestre, pero pueden reproducirse con diferentes perspectivas según dónde situemos el foco de luz. En la proyección acimutal gnomónica, el foco de luz se sitúa en el centro de La Tierra, en la estereográfica, en el polo opuesto del globo, y en la ortográfica, en un punto del espacio exterior. En todas las perspectivas no se proyecta toda la superficie de La Tierra, sino que se proyecta una porción de la misma.



Figura 12: Mapa proyección acimutal

La figura 12 muestra el mapa resultante de la proyección acimutal, el cuál presenta las mismas características que el mapa de la proyección cónica en cuanto a meridianos y paralelos, pero en este caso el centro es el punto tangencial a la esfera terrestre, dando lugar a un mapa con forma circular. En cuanto a la distorsión que provocan, se obtiene una mayor distorsión cuanto mayor sea la distancia al foco de luz. A diferencia de las proyecciones cónicas y cilíndricas, la distorsión aumenta en el Ecuador, por lo tanto, esta representación resulta útil para representar los polos.

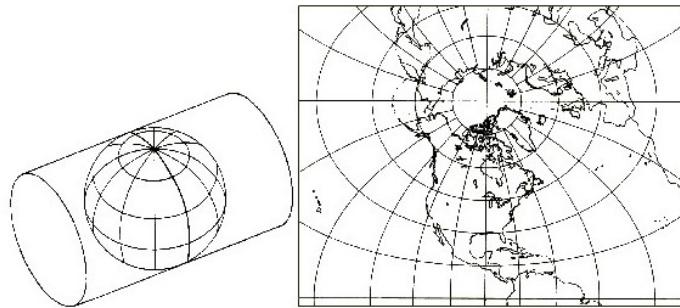


Figura 13: Proyección universal transversal de Mercator

Por cada familia, existen diversos tipos de proyecciones, en las cuales no vamos a profundizar. Pero sí que resulta interesante comentar algunos ejemplos de las proyecciones más conocidas y utilizadas. Entre las proyecciones cartográficas destaca la proyección cilíndrica de Mercator, ideada por Gerardus Mercator en 1569, la cuál revolucionó la cartografía. El sistema de coordenadas universal transversal de Mercator o *Universal Transverse Mercator* (UTM), es un PCS basado en esta proyección, pero en vez de hacerla tangente al Ecuador (Mercator normal), se la hace secante a un meridiano, tal y como se observa en la figura 13 UTM es la proyección mundial, por lo que podemos representar cualquier parte del mundo con ella. Como en el resto de proyecciones cilíndricas, los meridianos y paralelos son líneas rectas paralelas entre sí. Además en la proyección de Mercator, los meridianos son equidistantes y se extienden hacia el infinito al acercarse a los polos. Esta representación resulta útil para realizar cartas náuticas, debido a que las líneas rectas representan rumbos reales de la brújula. La variante Web Mercator es la proyección estándar para los servicios web de mapas, la cuál está disponible en la mayoría entornos GIS del mercado, así como distintas versiones de esta proyección.

Otra de las proyecciones más usadas y populares es la proyección cónica de Lambert, llamada así por su creador Johann Heinrich Lambert. En ella, los meridianos son líneas rectas cuyo origen es el vértice del cono, y los paralelos son circunferencias concéntricas respecto al vértice del cono. Esta representación fue usada principalmente en los mapas militares, debido a que la distorsión es mínima en una gran extensión del terreno, siendo nula en los paralelos de referencia.

La mayor diferencia con los GCS es que los PCS presentan mayor facilidad para trabajar, pero las distancias y ángulos presentan mayor distorsión debido a la proyección. Los GCS permiten ubicar mejor las posiciones, en cambio los PCS son mejores para medir distancias o calcular áreas de los objetos.

3.3. Datums Geodésicos

El datum de un dato geográfico se define mediante un sistema de referencia y una proyección cartográfica. Por ejemplo, podemos tener como sistema de referencia el WGS84, el cual veremos a continuación, y como proyección la proyección cónica de Lambert. Su objetivo es describir la forma y el tamaño de La Tierra más acorde a la realidad. Como hemos visto, los CRS representan la superficie de La Tierra, pero lo realizan con ciertas irregularidades debido a que esta no presenta una forma esférica perfecta.

3.3.1. Elipsoide

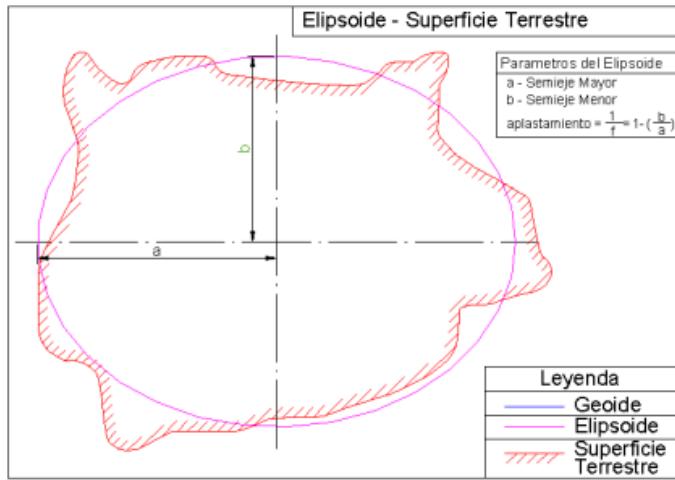


Figura 14: Comparación entre la superficie y el esferoide terrestre

Un Esferoide (o Elipsoide) representa La Tierra con mayor precisión, y surge como resultado de achatar la esfera terrestre por los polos, tal y como podemos observar en la figura 14. Un Esferoide queda definido por su semieje mayor (a), y su semieje menor (b), o por (a) y su aplastamiento (f), obtenido de la siguiente manera:

$$f = \frac{(a - b)}{a} \Leftrightarrow \frac{1}{f} = 1 - \left(\frac{b}{a}\right) \quad (3.1)$$

En el caso del esferoide terrestre, tenemos que el semieje a corresponde al Radio Ecuatorial y el semieje b al Radio Polar.

Hayford propuso en 1924 en la Asamblea Internacional de Geodesia y Geofísica (Madrid) un Elipsoide Internacional de Referencia, con un Radio Ecuatorial de 6378388 metros y un aplastamiento de 297 metros. Este elipsoide fue utilizado ampliamente por la mayoría de países, no siendo perfeccionado hasta 1964, donde la Unión Astronómica Internacional en Hamburgo estableció unos nuevos valores de 6378160 metros de Radio Ecuatorial y 298,25 metros de aplastamiento. Finalmente, se adoptó el Sistema de Referencia Geodésico 1980 o *Geodetic Reference System 1980* (GRS80) por la Asamblea General de Asociación Internacional de Geodesia (IAG) del año 1979. El GRS80 presenta un Radio Ecuatorial de 6378137 metros y un aplastamiento de 298.257222101 metros.

3.3.2. Geoide

Para definir completamente el término de Datum Geodésico, también es necesario introducir el concepto de Geoide. El Geoide se define como la superficie teórica de La Tierra que une todos los puntos que presentan una atracción gravitatoria constante.

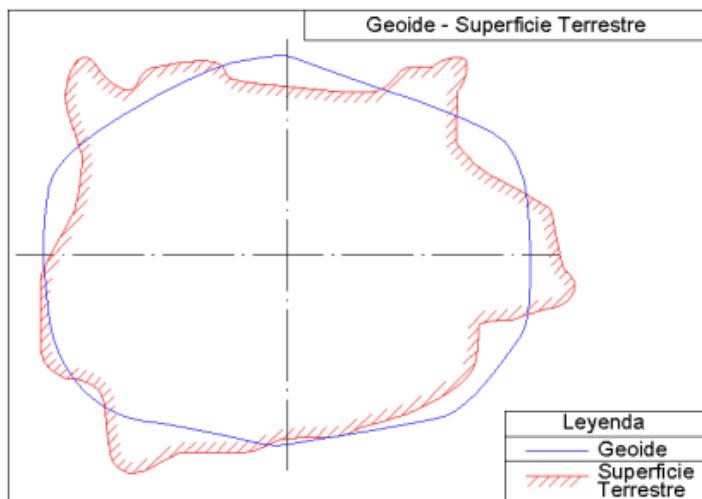


Figura 15: Comparación entre la superficie y el geoide terrestre

Aunque no lo parezca, esta superficie no es uniforme, debido a la distinta composición mineral y densidad del interior de La Tierra, provoca que exista una distancia distinta desde el centro de La Tierra al punto del Geoide, tal y como podemos ver en la figura 15. Dichas variaciones de densidad provocan anomalías gravimétricas que ocasionan la superficie irregular de Geoide. Tanto la figura 14 como la figura 15 se han obtenido del estudio [10].

El Geoide resulta más específico que el elipsoide a la hora de definir la forma de La Tierra. Aunque la diferencia máxima entre las superficies de ambas representaciones está en el orden de 100 metros. Estas diferencias se conocen como alturas geoidales.

Al igual que en el caso de los elipsoides, existen diversos geoides de referencia, y estos no son constantes en el tiempo, sino que evolucionan para adaptarse a las modificaciones que tienen lugar sobre la superficie terrestre.

3.3.3. Punto fundamental

Los datum globales son los que se utilizan para georreferenciar cualquier punto de la superficie de La Tierra, así que, tanto el centro del elipsoide, como su plano ecuatorial, deben coincidir con los terrestres. También existen los datums locales, que tratan de adaptar mejor el CRS a la superficie terrestre perteneciente a una región concreta. Para estos últimos, necesitamos ubicar el elipsoide en un punto de la superficie de La Tierra. Por lo tanto, cada datum local, además de por el modelo asociado de la forma de La Tierra (elipsoide) y por un modelo de campo de gravedad (geoide), está compuesto por un punto de referencia de la superficie de La Tierra, denominado punto fundamental. En este punto, el elipsoide es tangente al geoide y la distancia desde el centro de La Tierra es la misma para ambas formas geométricas. El punto fundamental queda definido por sus coordenadas geográficas (Latitud y Longitud).

Para un mismo elipsoide pueden utilizarse distintos puntos fundamentales, que darán lugar a distintos datums, y por lo tanto, a distintas coordenadas para un mismo punto.

3.3.4. Ejemplos

En el caso de la España, en 1970 se adoptó el Datum Europeo 1950 o *European Datum 1950* (ED50) como sistema geodésico oficial. El ED50 tiene como Elipsoide la propuesta por Hayford en 1924 y como punto de referencia Postman (Alemania), cuyas coordenadas geográficas son $52^{\circ} 22' 51.446''$ O, $13^{\circ} 03' 58.741''$ E. Actualmente, el Real Decreto [11] establece el Sistema Europeo de Referencia Terrestre 1989 o *European Terrestrial Reference System 1989* (ETRS89), como sistema de referencia geodésico oficial en España, exceptuando las Islas Canarias que adoptan la Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales Canarias 1995 (REGCAN95). Ambos sistemas tienen asociado el elipsoide GRS80.

En cuanto al datum global, el Sistema Geodésico Mundial 1984 o *World Geodetic System 1984* (WGS84), es el sistema de coordenadas geográficas usado mundialmente desde 1984. El WGS84 es utilizado habitualmente en la comunidad GIS y el datum por defecto en todos los dispositivos GPS. La elipsoide WGS84 es semejante a la elipsoide GRS80, siendo esta última un poco más aplanaada.

3.4. Identificador de Referencia Espacial

El Identificador de Sistemas de Referencia Espacial o *Spatial Reference System Identifier* (SRID), es un código que identifica de forma única los sistemas de coordenadas. Actualmente, el SRID se conoce como EPSG, acrónimo de *European Petroleum Survey Group*, organización relacionada con la industria petrolera en Europa, debido a que este organismo desarrolló y difundió el conjunto de parámetros geodésicos EPSG, un repositorio con elipsoides, datums, sistemas de coordenadas, proyecciones cartográficas, etc. Podemos consultar los códigos EPSG / SRID accediendo a la dirección [12]. Por ejemplo, el código 4326 corresponde al sistema de coordenadas WGS84 y el código 3857 a la variante Web Mercator.

Para finalizar, es importante destacar que ningún CRS es perfecto, todo CRS implica una compensación que puede distorsionar tanto forma, distancia o/y área de los datos reales.

3.5. Transformación y conversión de coordenadas

Cada proveedor de datos geográficos genera información con un datum determinado, es decir, con un sistema de referencia y una proyección cartográfica concretos. La realidad es que estos proveedores no se adaptan a las necesidades de cada particular, por lo tanto necesitamos transformar los distintos datums en el datum que mejor se ajuste a nuestra representación. Para tener único sistema de referencia y una única proyección es necesario realizar distintas operaciones, de las cuales nos distinguimos dos tipos:

- Conversión de coordenadas

Los sistemas de origen y destino comparten el mismo sistema de referencia. Es una transformación exacta y se basa en la aplicación de formulas establecidas que relacionan ambos sistemas. Por ejemplo, tengo un datum con un sistema de referencia WGS84 y una proyección de Lambert, y aplicamos una conversión para que el datum resultante sea con una proyección UTM, manteniendo el mismo sistema de referencia.

- Transformación de coordenadas

El sistema de referencia es distinto en los sistemas de origen y destino. Por ejemplo, tenemos un mapa con un sistema WGS84 y otro mapa con un sistema ETRS89, ambos con una proyección UTM. Entonces, para llegar del uno al otro se requiere una transformación del sistema de referencia.

Existen distintas herramientas que nos permitan realizar estas operaciones, por ejemplo, el Instituto Geográfico Nacional (IGN), mediante el programa de aplicaciones geodésicas (PAG), ofrece una calculadora geodésica que permite transformaciones entre coordenadas geográficas o entre datums.

Análisis espacial

El análisis espacial es la funcionalidad que caracteriza a los GIS. Consiste en manipular información espacial para extraer información nueva y significativa a partir de los datos originales.

4.1. Estadística espacial

La estadística espacial es la reunión de un conjunto de metodología para el análisis de datos espaciales. Estos datos corresponden a valores que toma una variable aleatoria en distintos puntos de una región. De manera más formal, se puede decir que la estadística espacial trata con el análisis de realizaciones de un proceso estocástico. El proceso estocástico parte de la idea de que datos cercanos en espacio están presumiblemente correlacionados, recogida en las leyes de Tobler en el artículo [13], concretamente en la denominada “Primera Ley de la Geografía” o principio de autocorrelación espacial, por la que: “Todas las cosas están relacionadas entre sí, pero las cosas más próximas tienen una relación mayor que las distantes”.

A partir de esta noción, podemos definir un proceso estocástico como una colección de variables aleatorias $\{Z(s) \in D / s \in R^d\}$, en donde s representa una ubicación que toma valores en el espacio R^d d-dimensional y $Z(s)$ es una variable aleatoria en la ubicación s que toman valores en el espacio de estados $D \subset R^d$. Si d es igual a 2, $Z(s)$ puede asociarse a una variable medida en un punto s del plano. En términos prácticos, $Z(s)$ puede verse como una medición de una variable aleatoria, por ejemplo, la temperatura

en un punto s de una región de estudio, representado por sus coordenadas geográficas o cartesianas.

Según esta definición, podemos interpretar a un proceso estocástico como una sucesión de variables aleatorias cuyas características pueden variar a lo largo del espacio. Pero también se puede definir un proceso estocástico en el que las variables aleatorias varían en función del tiempo.

El tipo de dato espacial a analizar permite una primera división de esta rama de la estadística. Hablaremos de datos geoestadísticos si las ubicaciones s provienen de un conjunto D fijo y continuo, es decir, el área de estudio está previamente delimitado por el analista, el cual toma puntos de observación en dicha región y en ellos mide alguna variable de interés. Por otro lado, hablaremos de análisis de patrones espaciales si las ubicaciones s pertenecen a un conjunto D aleatorio, discreto o continuo, que no depende del analista.

4.1.1. Análisis de patrones de puntos

Uno de los objetivos principales del análisis espacial es la detección de patrones. La disposiciones de los datos espaciales forman patrones de puntos, que permiten conocer el tipo de distribución que presenta una variable espacial en el espacio estudiado.

Tipos de patrones

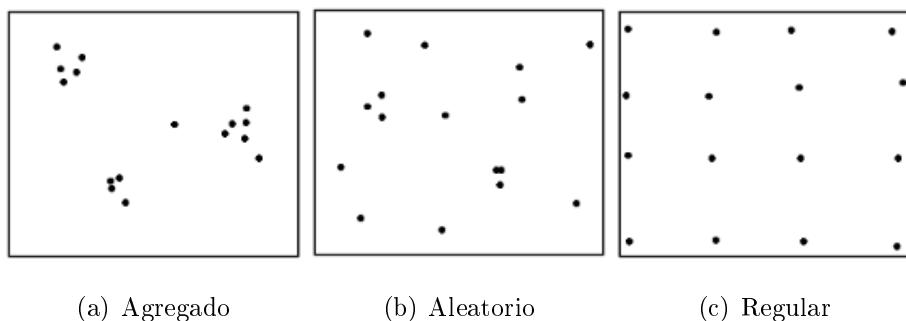


Figura 16: Tipos de patrones de puntos

- Agregado: Los puntos se disponen formando grupos, por lo que la densidad es mayor en esas zonas. Un ejemplo de patrón de puntos agrupado son los casos de enfermedades infecciosas.
- Aleatorio: Los puntos no presentan una estructura claramente definida, sino que están distribuidos aleatoriamente a lo largo de todo el espacio. Un ejemplo son la localización de accidentes de tráfico en una ciudad.
- Regular: Los puntos se disponen alejados entre sí a una distancia semejante, por lo que la densidad es constante. Un ejemplo son la posición de los paneles solares dentro de un parque fotovoltaico.

Medidas para determinar la distribución de los puntos

Existen una serie de medidas para determinar la distribución de los puntos sobre el espacio:

- Medidas que permiten calcular la densidad de puntos, número de puntos por unidad de superficie.
- Medidas que buscan determinar el carácter agregado, distribuido o aleatorio de los puntos sobre el espacio. Aquí se incluye la autocorrelación espacial, que mide el grado de agrupamiento o dispersión de los puntos, basándose tanto en las ubicaciones como en los valores que toman. Dado un conjunto de puntos y un atributo asociado a ellos, se emplea el Índice de Moran para evaluar si el patrón expresado está agrupado, disperso o es aleatorio.

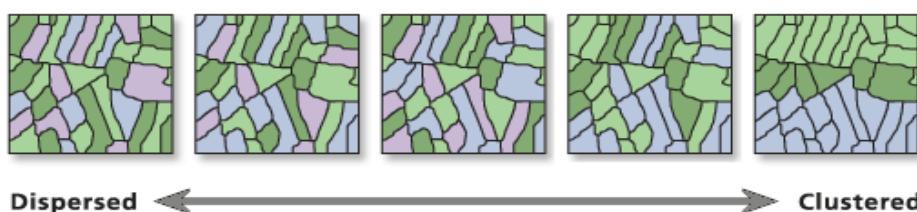


Figura 17: Transición de patrón disperso a agrupado

El Índice de Moran es positivo cuando se agrupan los valores similares y negativo cuando se agrupan los valores disímiles. En el caso de la figura 17, el Índice de Moran comienza con valores negativo para la imagen de la izquierda (patrón disperso) y va aumentando su valor hasta llegar a la imagen de la derecha (patrón agrupado) con valores positivos.

- **Medidas centrográficas**

Las medidas centrográficas representan descriptores básicos de los datos espaciales, extendiendo las medidas de tendencia central, como la media o la mediana, y de dispersión, como la desviación típica, de la estadística clásica al ámbito espacial.

- **Centro medio**

La principal medida de centralidad es el centro medio y se calcula como el valor medio en cada eje de coordenadas de los puntos analizados. Para un sistema bidimensional con un total de N puntos, el centro medio es el punto (\bar{x}, \bar{y}) tal que:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N} \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{N}$$

Podemos ponderar los puntos analizados según el valor a de alguno de sus atributos, tal que:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N a_i x_i}{\sum_{i=1}^N a_i} \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N a_i y_i}{\sum_{i=1}^N a_i}$$

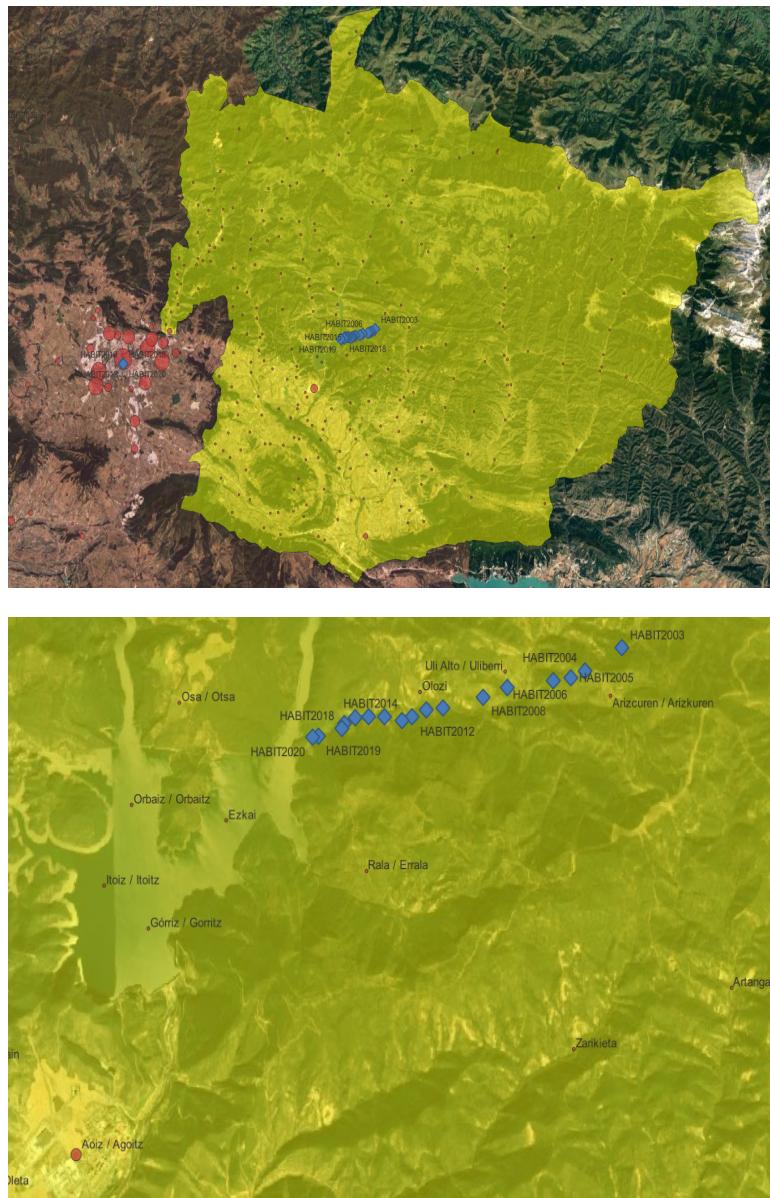


Figura 18: Centros medios demográficos en la zona del pirineo navarro

Un uso habitual del centro medio lo encontramos en los estudios demográficos. En la figura 18 podemos ver la evolución de las poblaciones sobre la zona del pirineo navarro y cómo se ha desplazado su centro medio a través del tiempo. Se puede apreciar una tendencia hacia zonas más pobladas como la capital (Pamplona) o el municipio con mayor población de la zona (Aoiz).

- Centro mediano

El equivalente espacial de la mediana es el centro mediano, que se calcula como el valor de las medianas en cada eje de coordenadas de los puntos analizados. Resulta interesante trazar líneas de división que dividen el conjunto de puntos en dos partes iguales. Por ejemplo, en el ámbito demográfico, podemos dividir el territorio en dos zonas igualmente pobladas.

- Distancia típica

En cuanto a las medidas de dispersión, el equivalente a la desviación típica es la denominada distancia típica, que se calcula como:

$$s_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}}$$

siendo d_i la distancia entre el punto i-ésimo y el centro medio. Se suele emplear la distancia euclíadiana, tal que:

$$d_i = \sqrt{(x_i - \bar{x}) + (y_i - \bar{y})}$$

Al igual que el centro medio, también podemos ponderar los puntos analizados según el valor a de alguno de sus atributos, tal que:

$$s_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n a_i d_i^2}{\sum_{i=1}^N a_i}}$$

Una forma de representar esta distancia típica es mediante un círculo de radio dicha distancia centrado en el centro medio.

Medidas para determinar la variación en el espacio

Las medidas vistas hasta ahora definen la distribución en un espacio reducido, pero si queremos estimar el comportamiento de la variable espacial a lo largo de todo el espacio, entran en juego dos conceptos estadísticos: estacionariedad e isotropía. Matemáticamente, decimos que un proceso es estacionario cuando no varía al transformarlo dentro de un espacio d-dimensional, e isotrópico cuando no varía por la rotación del punto de origen. En el ámbito geográfico, la estacionariedad indica que las medidas centrográficas no varían con la traslación, es decir, que la función de distribución de probabilidad, la cual nos proporciona la probabilidad de que una variable tome cierto valor, es constante en el espacio. La isotropía indica que las medidas centrográficas no varían con la rotación. Estas propiedades muestran el principio de replicación de un conjunto de datos. Por ejemplo, dos valores de una variable espacial con un comportamiento isotrópico y estacionario, separados por la misma distancia, deberán tener las mismas propiedades.

4.1.2. Geoestadística

La Geoestadística es un área de la estadística espacial que abarca al conjunto de técnicas usadas para analizar fenómenos que ocurren en la superficie terrestre y para predecir la distribución espacial de variables asociadas a dichos fenómenos. Algunos ejemplos de estos fenómenos espaciales son la Meteorología, Epidemiología, Geomárketing o análisis geográfico de mercados, Demografía, Criminología, entre muchos otros.

La Geoestadística permite reducir los costes de recolección de datos espaciales, que dependiendo del sector en el que se aplique, pueden ser muy elevados. Por ejemplo, en su origen (mediados del siglo XX), la Geoestadística se aplicó en la industria minera y de hidrocarburos, generando modelos probabilísticos para predecir localizaciones de yacimientos potenciales.

Interpolación

La interpolación espacial es uno de los principales análisis geoestadísticos basado en la estimación de valores desconocidos de una variable espacial a partir de puntos con valores conocidos. Analiza y simula el comportamiento de los datos en un espacio muestral, así como su influencia en otros puntos cercanos.

En un GIS, la interpolación de esos puntos puede ser aplicada para crear una superficie ráster con estimaciones realizadas para todas las celdas del ráster. Existen muchos métodos de interpolación, algunos de ellos son los siguientes:

- Vecino más cercano

La Interpolación del vecino más cercano o *Nearest Neighbor*, está basada en la generación de polígonos de Voronoi, que delimitan el área al punto de la muestra más cercano. Los polígonos de Voronoi se forman mediante líneas que se sitúan en el punto medio de los vecinos que le rodean, de modo que el perímetro es equidistante a todos los puntos vecinos.

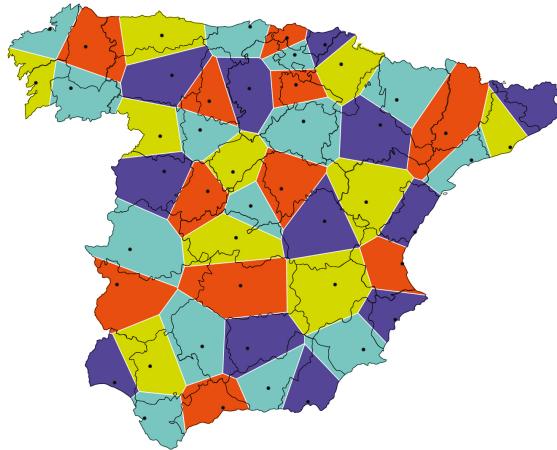


Figura 19: Polígonos de Voronoi España

La figura 19 muestra los polígonos de Voronoi obtenido mediante interpolación con método *Nearest Neighbor* de las capitales de provincia de España. Este método

es empleado en Geomárketing para conocer posibles áreas de influencia, o para realizar regionalizaciones o divisiones territoriales proporcionales.

- Vecino natural

La Interpolación de vecinos naturales o *Natural Neighbor*, al igual que la del vecino más cercano, genera polígonos de Voronoi, pero en este caso no se limita a su generación, sino que los emplea para realizar ponderaciones a los vecinos más cercanos.

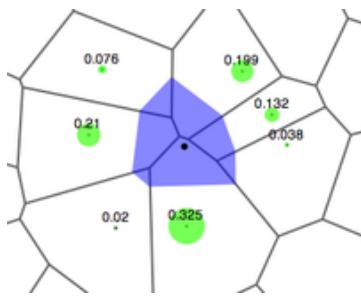


Figura 20: Ponderaciones vecinos naturales

Una vez generados los polígonos de Voronoi, se crea un nuevo polígono de Voronoi (polígono azul de la figura 20) alrededor del punto desconocido. La proporción de superposición entre el polígono azul y los polígonos iniciales se utiliza como ponderaciones.

- Distancia Inversa Ponderada

La Distancia Inversa Ponderada o *Inverse Distance Weighted* (IDW), es un método de interpolación que estima los valores desconocidos mediante una combinación ponderada de un conjunto de puntos de muestra que se encuentran en su vecindad. La influencia de cada punto de la muestra respecto al punto desconocido disminuye con la distancia a este. Un ejemplo de uso es la creación de mapas de elevación, como la figura 4 que vimos en la sección 2.4. En este caso el valor desconocido será la elevación y para calcularla se empleará la siguiente función:

$$\widehat{z}(x_j) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z(x_i)}{d_{ij}^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{ij}^p}}$$

En donde los valores de elevación z de los n puntos muestrales x_i utilizados en la estimación, con respecto a la distancia d_{ij} al punto desconocido x_j , se agregan mediante un sumatorio. La suma de la distancia inversa, que aparece en el denominador, sirve para normalizar el resultado de elevación del punto desconocido, es decir, para que tome valores de elevación comprendidos entre el mínimo y el máximo de los valores de elevación conocidos. El parámetro p , corresponde a la elevación a una potencia matemática que permite controlar la influencia de los puntos conocidos respecto al punto desconocido. Para valores altos de p , los puntos más cercanos tienen mayor influencia, de modo que la superficie resultante será menos suave, teniendo mayor detalle. Para valores más bajo, los puntos circundantes adquirirán más influencia que los que están más lejos, lo que resulta en una superficie más suave. El valor predeterminado de p es 2 y un valor superior a 30 deja de tener uso aplicativo.

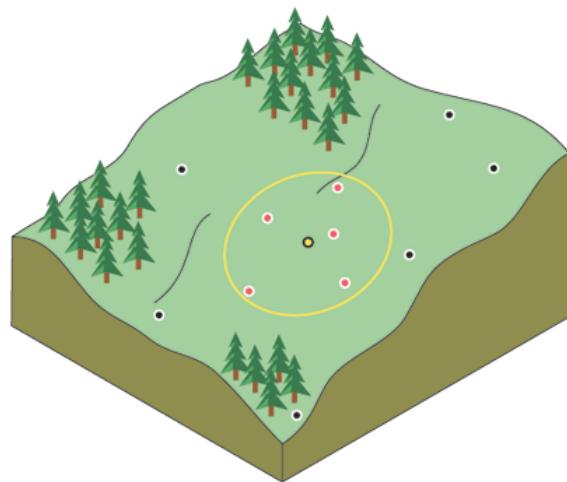


Figura 21: Distancia Inversa Ponderada en mapa de elevación

También se puede limitar los puntos interpolados, especificando un radio alrededor del punto desconocido, de modo que utilicemos los puntos de la muestra que se encuentren en el interior de este. En la figura 21 vemos que aunque tengamos un conjunto de puntos de muestra (puntos rojos y azules), sólo se emplean los puntos más próximos (puntos rojos) para realizar la interpolación. El radio de búsqueda puede ser fijo o variable. En caso de ser fijo, se deberá establecer un número mínimo de puntos, de modo que si hay menos puntos dentro del radio, este aumentará hasta llegar al mínimo de puntos estipulado. En los radios de búsqueda variables, se establecer un número de puntos, lo que provoca que la distancia del radio varíe en función de la densidad de los puntos conocidos cercanos al punto desconocido. En este caso, se puede especificar una distancia máxima del radio de búsqueda. También existe la posibilidad de añadir barreras que limitan la búsqueda de los puntos de muestra, impidiendo seleccionar los puntos que se encuentran detrás de ellas. Estas barreras se añaden en forma de polilíneas sobre la superficie que se analiza y pueden representar barreras de ruido, acantilados, carreteras, entre otros.

- Red Irregular Triangulada

La Red Irregular Triangulada o *Triangulated Irregular Network* (TIN), es una representación vectorial de la superficie formando una malla triángulos no superpuestos, cuyos vértices se calculan a partir de son los puntos muestrales de valores conocidos.

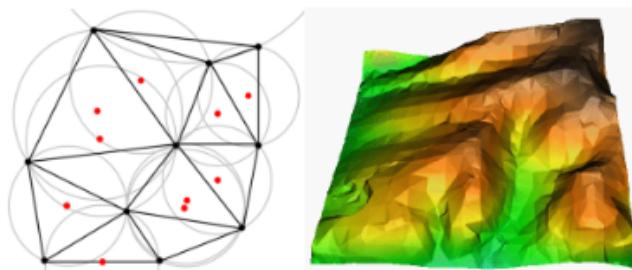


Figura 22: Triangulación de Delaunay

El algoritmo TIN para generar esa malla de triángulos más empleado es la triangulación de Delaunay, en la que se crea circunferencias alrededor de los puntos de muestra, conectando algunas de sus intersecciones, de modo que la circunferencia que da lugar a de cada triángulo de la red no debe contener ningún vértice de otro triángulo. Esto lo podemos ver mejor en la representación de la figura 22, en donde también podemos ver el superficie TIN interpolada resultante

Las aristas de las TIN pueden representar la posición de entidades lineales que desempeñan un papel importante en la superficie, como una cresta montañosa o un río. Cada triángulo representa una zona homogénea en la que la variable espacial toma valores semejantes. Destaca su uso en la representación de modelos digitales de elevación, aunque puede aplicarse en otros campos, por ejemplo empleando variables ambientales.

4.2. Otras técnicas de análisis espacial vectorial

4.2.1. Zonas buffer o de influencia

Las zonas buffer o zonas de influencia son polígonos que envuelven objetos vectoriales con una distancia especificada. Según el CRS empleado, tenemos varias formas de medir las distancias, dando lugar a zonas buffer euclidianas y geodésicas. Las zonas buffer euclidianas se crean cuando los objetos de entrada tienen un Sistema de Coordenadas Proyectadas y las geodésicas en los casos de emplear un Sistema de Coordenadas Geográficas. En ambos casos el valor de la distancia tiene que estar en unidades métricas, por defecto en metros.

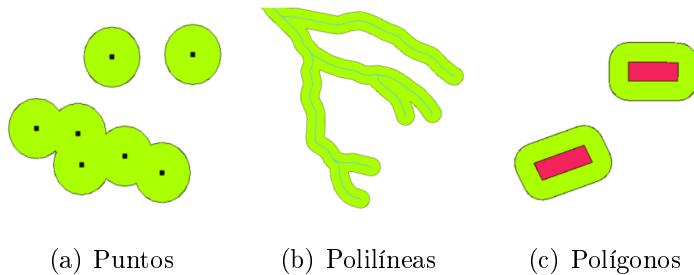


Figura 23: Zonas buffer alrededor de objetos vectoriales

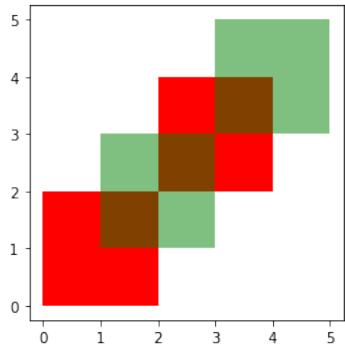
En la figura vemos zonas buffer generadas a partir de puntos, polilíneas y polígonos. El tamaño de la zona buffer puede variar en función de atributos de los datos espaciales incluidos en la capa vectorial. Por ejemplo, el ancho de una zona buffer a lo largo de la ribera de un río puede variar dependiendo del uso de los terrenos adyacentes. Otra cosa que podemos hacer es configurar las zonas buffer alrededor de polilíneas, ríos o carreteras, para que se generen sólo a un lado de la línea. En estos casos, el lado se elige en función de la dirección desde el punto de inicio hasta el punto final de la linea definida durante su digitalización.

Las zonas buffer se utilizan a menudo para proteger el medio ambiente, proteger zonas residenciales o comerciales de accidentes industriales o desastres naturales, o para prevenir la violencia. Algunos tipos habituales de zonas buffer pueden ser los cinturones verdes entre zonas residenciales y comerciales, zonas fronterizas entre países, zonas de protección acústica alrededor de aeropuertos, o zonas de protección de la contaminación a lo largo de los ríos, etc.

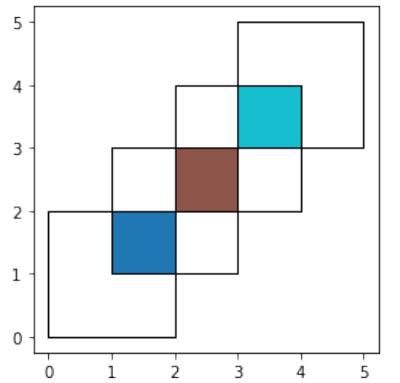
4.2.2. Superposición espacial

Superposición espacial es un proceso que permite identificar las relaciones entre dos entidades poligonales que comparten todo o parte de la misma superficie. El vector de salida es una combinación de la información de las entidades de entrada. En términos de GIS, la superposición espacial se realiza sobre dos capas vectoriales (capas de entrada) y da como resultado otra capa vectorial (capa de salida).

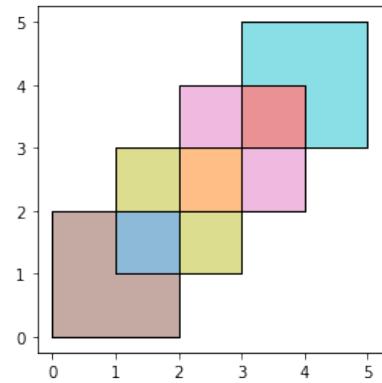
Vamos a emplear las siguientes capas de entrada:



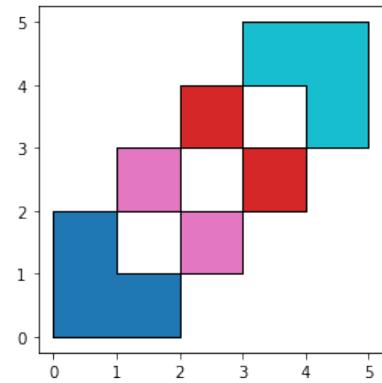
Vemos dos capas, una de color verde y otra de color rojo, formadas por dos cuadrados cada una del mismo tamaño.



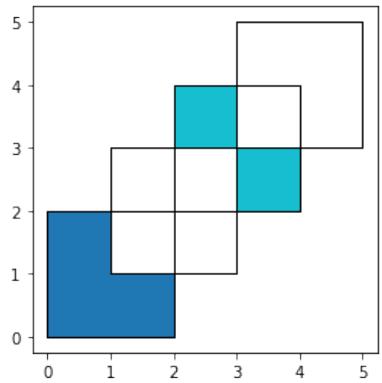
(a) Intersección



(b) Unión



(c) Diferencia simétrica



(d) Diferencia

Figura 24: Tipos de superposición espacial

La figura 24 muestra los ejemplos típicos de superposición espacial.

- Intersección: La capa de salida contiene las áreas donde las capas de entrada se solapan.
- Unión: La capa de salida contiene una combinación de las áreas de las capas de entrada.
- Diferencia simétrica: La capa de salida contiene todas las áreas de las capas de entrada excepto aquellas áreas en donde las capas se intersectan.
- Diferencia: La capa de salida contiene todas las áreas de la primera capa de entrada (color rojo) que no intersectan con la segunda capa de entrada (color verde).

Inteligencia Artificial Geoespacial

La Inteligencia Artificial Geoespacial o *Geospatial Artificial Intelligence* (GeoAI), es el campo científico que surge de la combinación entre la innovación en la ciencia espacial, el consolidación de las aplicaciones de Inteligencia Artificial y el aumento de la capacidad de cómputo del hardware. El objetivo de la GeoAI es la extracción de conocimiento a partir de grandes volúmenes de datos espaciales. Vivimos en la era de la digitalización y con ella se generan grandes volúmenes de datos, muchos de ellos de naturaleza geográfica, ya que la mayoría de la información que nos rodea puede ser georreferenciada. En el artículo [14] escrito por ESRI, empresa que comercializa las aplicaciones ArcGIS (comentadas en la sección 2.6), se dice que “aproximadamente el 80 % de los datos de una organización tiene un componente de ubicación”.

En el análisis espacial, descrito en el capítulo anterior, podemos ubicar distintos eventos, pero con la GeoAI podemos conocer el por qué suceden dichos eventos. Además, la GeoAI nos aporta una capacidad predictiva, permitiéndonos saber con antelación lo que va a suceder, muy útil por ejemplo en el campo de la meteorología, para la predecir fenómenos meteorológicos adversos. También nos aporta una capacidad prescriptiva, permitiéndonos saber cómo actuar y tomar la decisión más correcta. Un ejemplo de ello son los patrones delictivos, cuya comprensión permite a las autoridades policiales gestionar de forma más eficiente sus recursos.

5.1. Inteligencia Artificial

La Inteligencia Artificial o *Artificial Intelligence* (IA), tiene como objetivo que las máquinas sean capaces de realizar, sin ayuda, tareas que necesitarían intervención humana, o lo que es lo mismo, simular la inteligencia humana en máquinas. Existen dos campos destacados dentro de la IA: Aprendizaje Automático y Aprendizaje Profundo.

5.1.1. Aprendizaje Automático

El Aprendizaje Automático o *Machine Learning* (ML), se basa en el uso de experiencias anteriores (instancias o ejemplos) para aprender de estas. Cada instancia queda representada por una serie de características o atributos en diferentes clases o categorías, y a partir de esa información, los sistemas obtienen un conocimiento, que dependiendo del uso que se le da, nos encontramos con tres grandes tipos de problemas:

- Problemas de Regresión: el conocimiento se emplea para hacer predicciones sobre nuevos datos.
- Problemas de Clasificación: el conocimiento se emplea para decidir cuál es la clase a la que pertenecen los ejemplos nuevos sin etiquetar.
- Problemas de Clustering: el conocimiento se emplea para identificar clústeres, es decir, grupos de instancias agrupadas en base a alguna característica común.

Según la forma en la que se utiliza la información con la que el ML aprende, nos encontramos cuatro grandes grupos:

- Aprendizaje supervisado

La información de la que se aprende se trata de datos que han sido etiquetados o clasificados previamente. A partir de estos, se busca el predecir y clasificar nueva información.

- Aprendizaje no-supervisado

La información a partir de la que se aprende no está ni clasificada ni etiquetada

previamente. Tiene como objetivo el tratamiento de estos datos para conseguir una forma de describirlos.

- Aprendizaje semi-supervisado

La información a partir de la que se aprende puede estar etiquetada o no etiquetada, con el fin de conseguir información etiquetada y clasificada, suele ser una tarea difícil y costosa.

- Aprendizaje por refuerzo

El aprendizaje se basa en interactuar con el entorno con el fin de maximizar unas recompensas, que serán mayores o menores en función de la forma en la que interactúa el sistema con el entorno.

Un ejemplo aplicado de ML es el diagnóstico médico automatizado a partir de historiales médicos de pacientes. En este caso sería un problema de clasificación que emplea aprendizaje supervisado, en el que las instancias son los pacientes, las características son los datos del historial médico y las cases indican si tiene o no alguna enfermedad.

5.1.2. Aprendizaje Profundo

El Aprendizaje Profundo o *Deep Learning* (DL), es un tipo de ML formado por algoritmos inspirados en el funcionamiento de nuestro cerebro, empleando redes de neuronas interconectadas que intercambian información, conocidas como Redes Neuronales.

Perceptrón

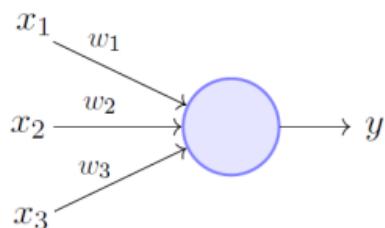


Figura 25: Modelo de un perceptrón

Existen varios tipos de redes neuronales, el más simple es el *Perceptrón*, formado por una sola neurona. Como se observa en la figura 25, la neurona recibe un conjunto de valores de entrada $\{x_1, x_2, x_3\}$, que se combinan con el conjunto de pesos $\{w_1, w_2, w_3\}$, a lo que se le añade un bias b , para producir una salida y . Por lo tanto, el *Perceptrón* puede expresarse mediante la siguiente fórmula:

$$y = \begin{cases} 1 & \text{si } x_1 * w_1 + x_2 * w_2 + x_3 * w_3 + b \geq 0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Red Neuronal Artificial

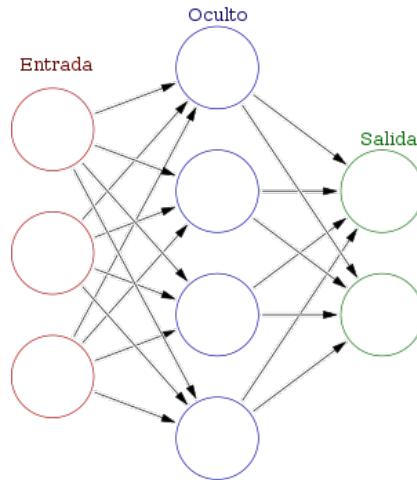


Figura 26: Red Neuronal Artificial

La Red Neuronal Artificial está formada por un conjunto de perceptrones agrupados en capas, en donde la combinación de las salidas de la capa anterior y los parámetros del perceptrón, producen la salida de este, que a su vez puede emplearse como entrada para una capa más profunda. En la figura 26 vemos su arquitectura representada. La primera capa o capa de entrada es la que recibe los datos con los que la red aprende, las capas intermedias o capas ocultas son las que van detectando distintos patrones de la información de entrada y la última capa o capa de salida obtiene el resultado final, por ejemplo la clase a la que pertenece un ejemplo de entrada. Cuando la red tiene un

número elevado de capas ocultas, hablamos de redes neuronales profundas, que son las que realmente dan origen al término DL.

Según la función que define al *Perceptrón*, teníamos que la salida puede ser 0 o 1. Para que la salida no sea binaria se emplean las funciones de activación. Algunas de ellas las podemos ver en la siguiente tabla:

	Función	Rango
Sigmoidea	$\sigma(z) = \frac{1}{1+e^{-z}}$	[0,1]
Tangente hiperbólica	$tanh(z) = \frac{e^z - e^{-z}}{e^z + e^{-z}}$	[-1,1]
ReLU	ReLU = $\max(0, z)$	[0, $+\infty$]
Lineal	$g(z) = z$	[- ∞ , $+\infty$]

en donde $z = \sum_i w_i * x_i - b$.

Para que la red sea capaz de aprender, tiene que ajustar los parámetros de la red (pesos y bias) de cada una de las neuronas, minimizando la función de coste, que suele ser el error cuadrático medio. Para ello, se emplea el algoritmo del descenso por gradiente. Este algoritmo de optimización se basa en el concepto de que la derivada de una función es la pendiente de la tangente en ese punto. Cuando se encuentra en un máximo o un mínimo, está pendiente se evalúa a cero. Para aplicar este algoritmo a toda la red y actualizar sus parámetros se realiza una propagación hacia atrás o *backpropagation*.

Red Neuronal Convolucional

Las redes neuronales convolucionales o *Convolutional Neural Networks* (CNN), son un tipo de red neuronal artificial diseñada para que trabaje con matrices de dos o tres dimensiones, normalmente imágenes. La forma que tiene la red de interactuar con esta información es utilizando las operaciones de convolución entre dos matrices.

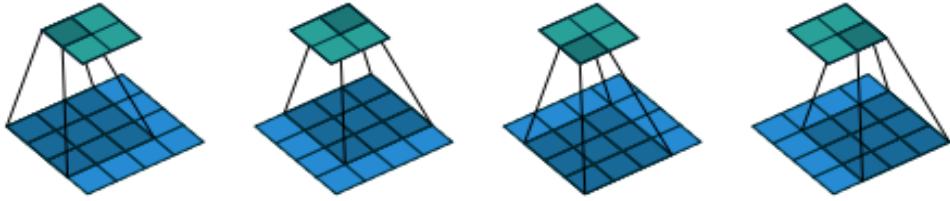


Figura 27: Convolución entre dos matrices

Una convolución es una técnica que aplica un filtro g sobre los píxeles de una imagen, por ejemplo, para desenfocarla o para detectar bordes. En el procesamiento de imágenes, g se denomina función kernel o matriz de convolución con dimensión $m \times n$, que recorre la imagen de entrada realizando una combinación de los coeficientes de la función Kernel y las intensidades de los píxeles de la imagen. Podemos observar dicho proceso en la figura 27. Formalmente, la convolución entre g y una imagen f de dimensión $M \times N$ se escribe como

$$(g * f)(x, y) = \sum_{i=-a}^a \sum_{j=-b}^b g(s, t) f(x + i, y + j)$$

La CNN recibe una imagen o capa ráster como entrada, a la que aplica una serie de convoluciones a través de las capas convolucionales, cuyas neuronas tienen los valores de la función kernel como pesos. Posteriormente, se realiza la activación de la neurona, y si la imagen resultante sigue teniendo un tamaño elevado, se vuelve a repetir el proceso (convoluciones + activación). Las convoluciones permiten a la red extraer características, desde bordes en las primeras capas hasta formas más complejas en las capas profundas. También existen otras capas para acelerar el proceso de reducir el tamaño de los valores de salida, llamadas capas pooling. Estas agrupan la salida de la neurona, produciendo un único valor. Para ello se suele emplear la media aritmética o máximo.

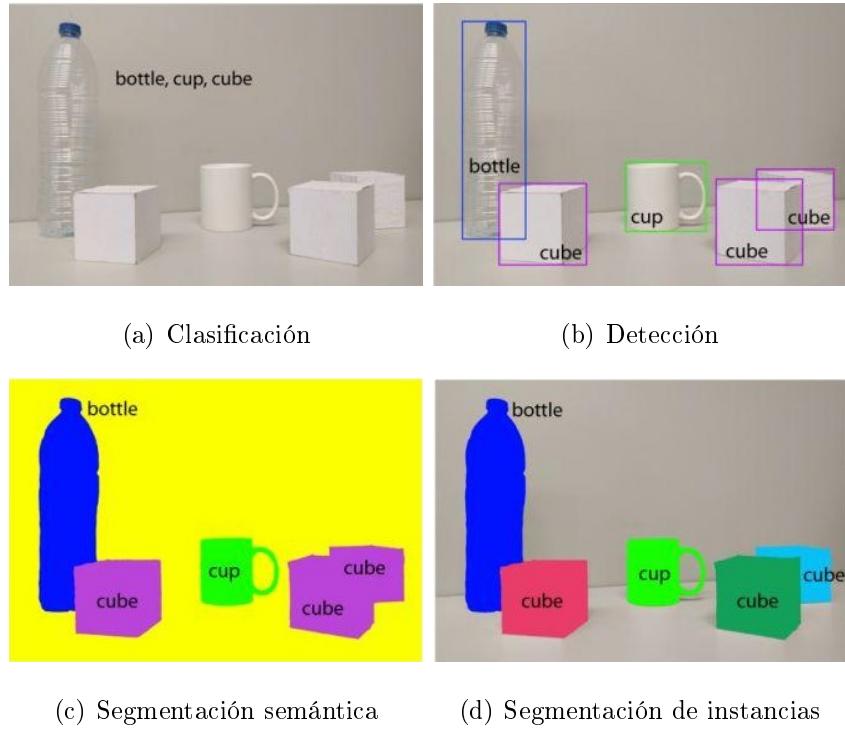


Figura 28: Algoritmos de procesamiento de imágenes

Las CNN han permitido grandes avances en el procesamiento de imágenes, permitiendo resolver problemas de segmentación, clasificación y detección de objetos en imágenes, los cuales podemos ver en la figura 28. La clasificación asigna una clase a la imagen de entrada, dentro de las diferentes clases que el algoritmo conoce. La detección de objetos supone un paso más y no nos indica solamente que la imagen contiene unos objetos, sino que también dice donde se encuentran esos objetos dentro de la imagen. Para ello delimita cada objeto con un rectángulo conocido como bounding box, que se ajusta al máximo a los límites del objeto. En ocasiones el empleo de bounding box no es suficiente, ya que hay problemas en los que se requiere detectar todos los píxeles del objeto. Es estos casos se emplea la segmentación, que puede ser de tipo semántica cuando detecta todos los píxeles de la imagen correspondientes a cada clase. También existe la segmentación de instancias, que diferencia las instancias dentro de las clases detectadas.

5.2. Inteligencia Artificial con datos espaciales

A continuación, comentaremos algunos ejemplos de algoritmos de IA aplicados sobre datos espaciales. Estos tipos de datos nos permite tener mayor información de las instancias empleadas para aprender, ya que además de estar formadas por un conjunto de atributos, cuentan con una geometría que les define en el espacio.

5.2.1. Modelos de aprendizaje automático

Clustering con k-means

K-means es un algoritmo de clustering no-supervisado. La identificación de clústeres se realiza en función de la distancia, en el que cada clúster queda definido en base de la proximidad espacial de las instancias.

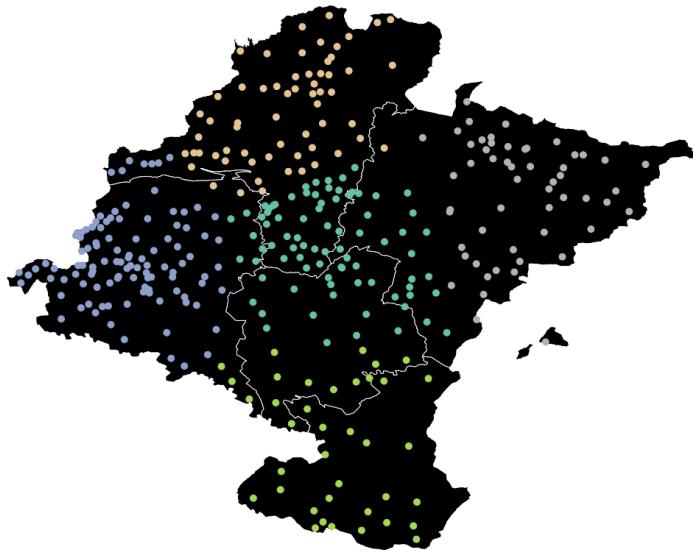


Figura 29: Clústeres municipios en base a la distancia

En la figura 29 se observa el resultado de aplicar el algoritmo de k-means, con k igual a 5, basado en la distancia sobre los municipios de Navarra. El mapa base está formado por las merindades de Navarra (Pamplona, Estella, Olite, Sangüesa y Tudela) y se

puede apreciar cierta coincidencia entre los clústeres generados y el área que ocupa las merindades.

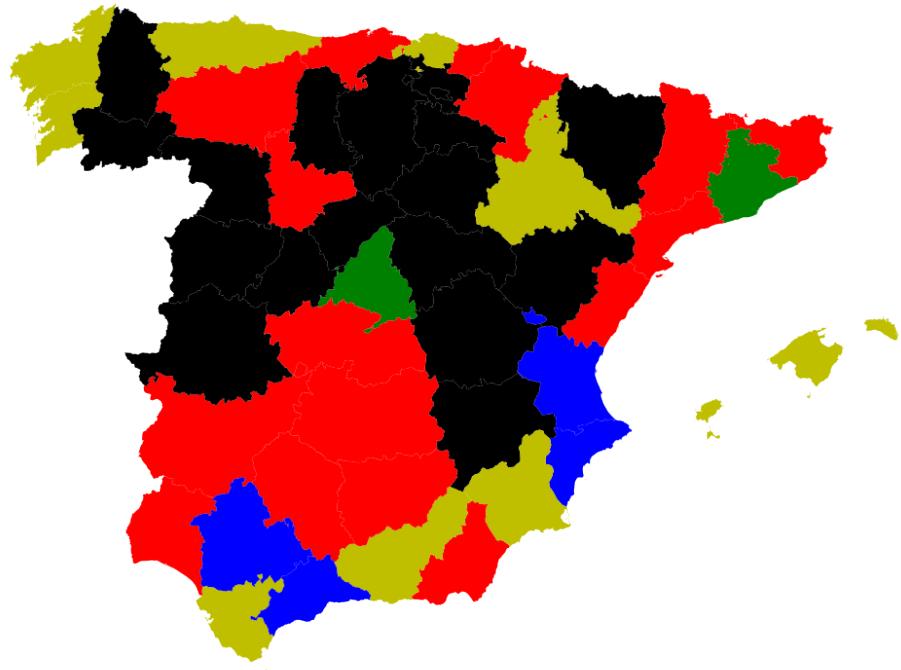


Figura 30: Clústeres provincias en base a la población

Provincia	Habitantes	cluster
Madrid	6769113.0	1
Barcelona	5641485.0	1
València/Valencia	2589308.0	2
Sevilla	1960257.0	2
Alacant/Alicante	1904362.0	2
Málaga	1711693.0	2
Murcia	1522640.0	3
Cádiz	1259339.0	3

También existe la identificación de clústeres en función de la “proximidad estadística”, es decir, en base a una determinada significancia estadística de alguno de los atributos numéricos. Incluso podemos emplear más de un atributo estadístico, asignando un peso a cada uno de ellos. En la figura 30 se observa el resultado de aplicar k-means, con k igual a 5, basado en el número de habitantes de cada provincia de España. En concreto se ha obtenido el número total de habitantes por provincia en el primer semestre de 2022 (Fuente: Instituto Nacional de Estadística). Podemos ver en la tabla el top 8 de las provincias con mayor número de habitantes y el clúster en el que se encuentran.

El uso del clustering de datos espaciales es común para discretizar características que se vayan a emplear en otros modelos. Por ejemplo, según la agrupación de provincias en base a la población reflejada en la figura 30, podemos asociar a cada provincia una población “Muy Baja”, “Baja”, “Media”, “Alta” o “Muy Alta”. En el estudio [15] se emplea esta técnica con el fin de entrenar una red neuronal que devuelve el número de contagios totales de COVID-19 que se iba a tener al día siguiente.

Clasificación con máquinas de vector de soporte

El modelo de Máquina de Vector de Soporte o *Support Vector Machine* (SVM) es un algoritmo de clasificación supervisado. Dado un conjunto separable de n ejemplos de entrenamiento, cada uno de ellos con d atributos y que pertenecen a la clase +1 o -1, existe infinitos hiperplanos que los separan. La regresión lineal o logística devuelve uno de los hiperplanos que separa los ejemplos por clase. La diferencia con SVM es que este encuentra el hiperplano más óptimo, que es aquel en el que el margen es de tamaño máximo. El margen es la distancia mínima entre el hiperplano y el(los) ejemplo(s) más cercano(s) de cualquier clase.

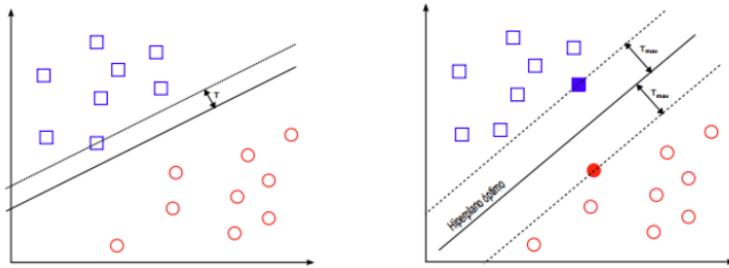


Figura 31: Hiperplano en el modelo SVM

En la figura 31 vemos dos ejemplos de hiperplanos que separan los ejemplos según su clase. El de la derecha resulta ser el más óptimo, ya que es el de margen con más tamaño, y además es equidistante a los ejemplos de ambas clases (ejemplos resaltados). Estos ejemplos son los vectores de soporte, y se denominan así en lugar de puntos porque tienen tantos elementos como dimensiones tenga nuestro espacio de entrada. En este caso sería d -dimensional ya que hemos definido a cada ejemplo con d atributos.

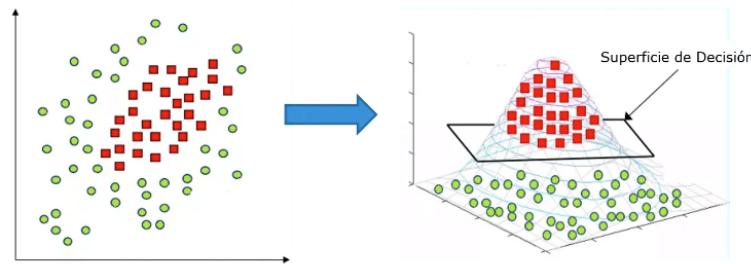
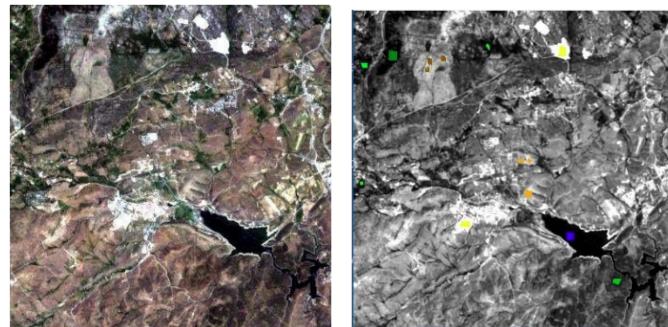


Figura 32: Función Kernel en el modelo SVM

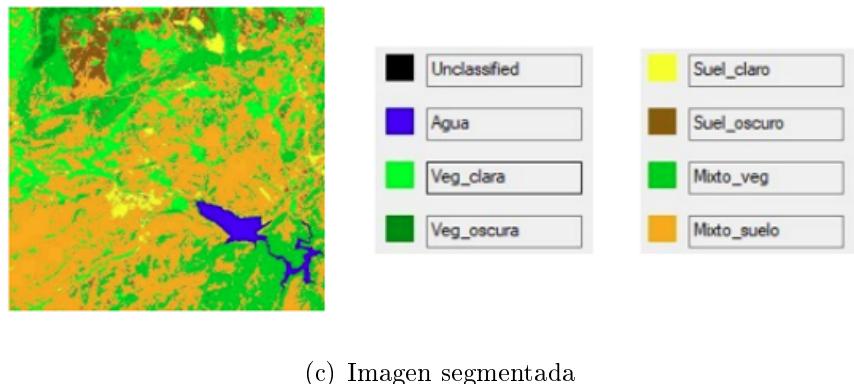
No siempre nos encontramos con clases linealmente separables. En esos casos podemos emplear las funciones kernel para que sí lo sean. Consisten en expandir las dimensiones del espacio original para que las clases sean linealmente separables. En la figura 32 vemos que los conjuntos de ejemplos de cada clase no son linealmente separables en dos dimensiones, pero sí que lo son si convertimos el espacio estudiado a 3 dimensiones.

En cuanto al empleo de los SVM en GIS, el modelo se emplea para varios objetivos, ya que soluciona tanto para problemas de regresión como de clasificación. Por ejemplo,

podemos seleccionar atributos numéricos de datos espaciales como características de los ejemplos con los que entrenamos al SVM. En este caso podemos emplear otro atributo como clase con la que se etiqueta cada ejemplo. Si ese atributo tiene valor continuo, como por ejemplo la altitud, estamos ante un problema de regresión. Si el atributo toma valores en un conjunto finito y discreto, como por ejemplo el uso del suelo, estamos ante un problema de clasificación. También los SVM se emplean la clasificación de imágenes, en dónde las características de cada ejemplo corresponden a las coordenadas de cada punto. En notebook [16] de Kaggle, vemos un ejemplo de SVM como clasificador de imágenes según su color. Kaggle es la plataforma educativa más grande del mundo en materia de Ciencia de Datos y los notebooks son entornos de Python que permite disponer bloques de texto y de código, estos últimos comparten las mismas variables pero se pueden ejecutar de forma independiente.



(a) Imagen satelital original (b) Ejemplos entrenamiento



(c) Imagen segmentada

Figura 33: Segmentación imagen satelital mediante SVM

Por último, los SVM se emplean en segmentación de imágenes, cuyo ejemplo podemos ver en la figura 33, en donde se recoge como entrada una imagen ráster capturada por un satélite. A partir de esa imagen se etiquetan algunos píxeles con las etiquetas definidas que sirven como entrenamiento del modelo SVM. Finalmente se realiza la clasificación del resto de píxeles de la imagen.

5.2.2. Modelos de aprendizaje profundo

Durante 2021, la empresa ESRI ha desarrollado 25 modelos de DL que los ofrece como *SaaS (Software as a Service)* [17]. Los modelos se emplean para el reconocimiento y la clasificación de objetos en imágenes aéreas o satelitales. Algunos de los modelos clasifican infraestructuras como carreteras o redes eléctricas, otros detectan personas, y también hay varios que están relacionados con el agua. Algunos ejemplos de ellos son:

Clasificación de la cobertura terrestre en imágenes de alta resolución

El término de cobertura terrestre hace referencia al material físico del que se compone la superficie terrestre. Existe un inventario dirigido por la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) sobre la cobertura terrestre y el uso del territorio en la Unión Europea, denominado *CORINE Land Cover (CLC)*. El CLC distingue entre zonas forestales, masas de agua y superficies artificiales, como zonas urbanas, zonas industriales, superficies agrarias, entre otros. En el artículo [18] se define en detalle cada una de las 44 clases de la cobertura terrestre propuestas por CLC.

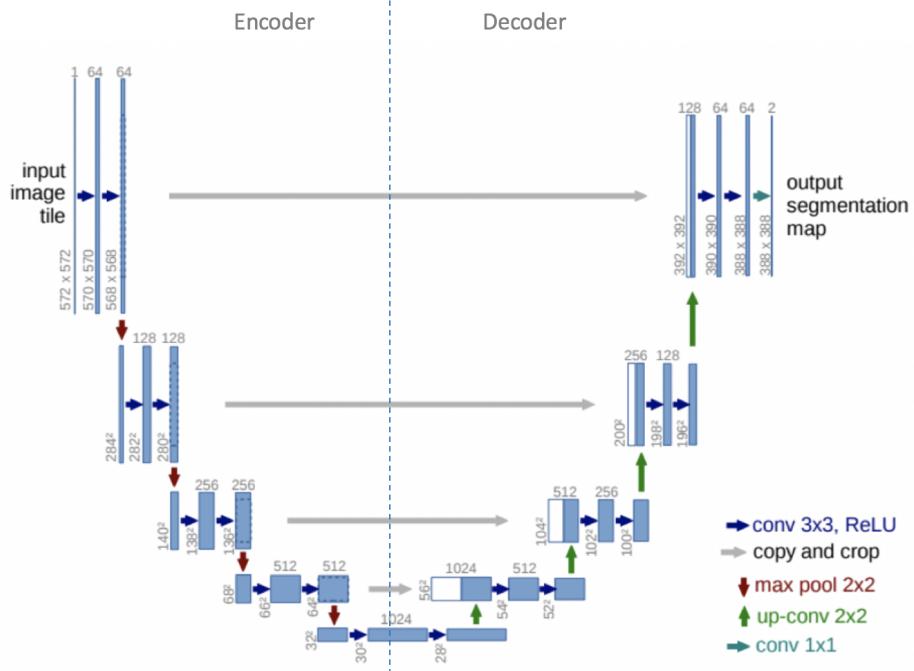
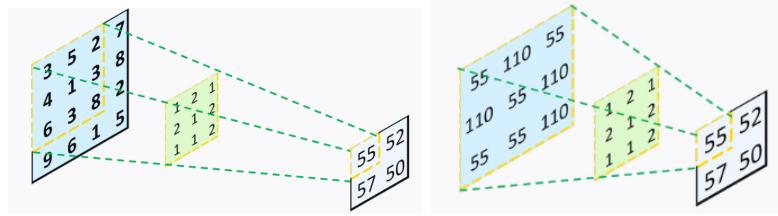


Figura 34: Arquitectura modelo U-net

El modelo toma como entrada un conjunto de imágenes ráster y genera la cobertura terrestre empleando las clases del CLC. Para ello, emplea el algoritmo de segmentación semántica *U-net*, cuya arquitectura podemos observar en la figura 34. *U-net* utilizó por primera vez para la segmentación de imágenes biomédicas [19], se compone de una red codificadora seguida de una red decodificadora. La red codificadora es una red de clasificación preentrenada como *VGG/ResNet* en la que se aplican capas de convolución seguidas de capas pooling empleando el máximo (maxpool), para codificar la imagen de entrada en diferentes características, que finalmente quedan contenidas en un array de 1024 valores. Para proyectar esas características a un espacio de mayor dimensión se emplea la red decodificadora que proyecta, en donde se realizan operaciones seguidas de convolución ascendente, también conocida como convolución transpuesta.



(a) Convolución

(b) Convolución transpuesta

Figura 35: Operaciones de convolución

En la figura 35 vemos la diferencia entre la operación de convolución y la de convolución transpuesta. En la convolución transpuesta aumentamos el tamaño de la matriz, pero los valores originales no se restauran si se emplea la misma función Kernel. Si se quiere restaurar la matriz original, se debe emplear otra función kernel, que en el caso de las CNN se inicia con números aleatorios y se modifica a medida que la red aprende. En el artículo [20] explica una forma de realizar la operación de convolución transpuesta empleando una matriz de convolución rellena de ceros, en lugar de emplear una matriz cuadrada como las de la figura 35.



Figura 36: Cobertura terrestre

La salida del modelo se muestra en la figura 36, correspondiente a una imagen con la cobertura terrestre de la imagen original.

Detección de personas en imágenes de drones

Los drones se utilizan para capturar imágenes de alta resolución, muy útiles para que los equipos de emergencias inspeccionen el terreno en caso de desastres naturales. En estos casos es posible encontrar supervivientes, pero la detección de personas de forma manual requiere mucho tiempo y además es propensa a errores humanos. Por ello, resulta interesante contar con un modelo que toma como entrada un conjunto de imágenes de drones de alta resolución (de 1 a 5 cm) y devuelve los bounding box que envuelven a las personas que aparecen en cada imagen. Para ello, el modelo emplea el algoritmo de detección de objetos *FasterRCNN*, que forma parte de la familia *R-CNN*.

- R-CNN

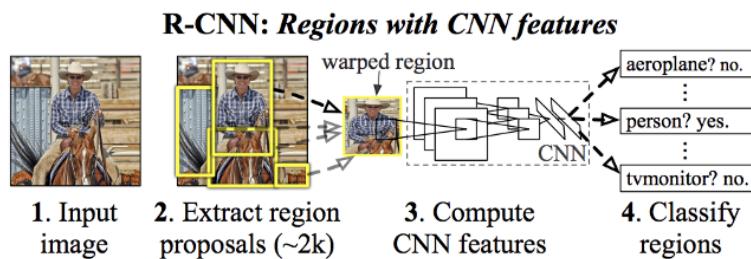


Figura 37: R-CNN

La Red Neuronal Convolucional basada en Regiones o *Region-based Convolutional Neural Networks* (R-CNN) presenta el siguiente flujo, el cual se muestra en la figura 37.

1. Se realiza una extracción de regiones de interés de una imagen de entrada. Para ello se puede emplear el algoritmo *Selective Search*, que utiliza un método de segmentación exagerada de la imagen basada en la intensidad de los píxeles.
2. Cada región se pasa a una CNN para extraer las características.

3. Por último, la información obtenida por la CNN es interpretada por un conjunto de *SVMs*, en donde cada una de estas, esta entrenada para detectar una sola clase.

Este modelo contiene ciertas limitaciones. La más clara es el tiempo necesario para el entrenamiento del modelo completo, ya contiene varias etapas, por lo que es un proceso largo y complicado. Además, es necesario evaluar todas y cada una de las regiones, una por una, con la CNN, lo que aumenta más el tiempo de entrenamiento. Para solucionar las limitaciones del modelo diseñado en 2014, en 2015 se introduce una extensión de la primera versión de R-CNN, llamada Fast R-CNN.

- Fast R-CNN

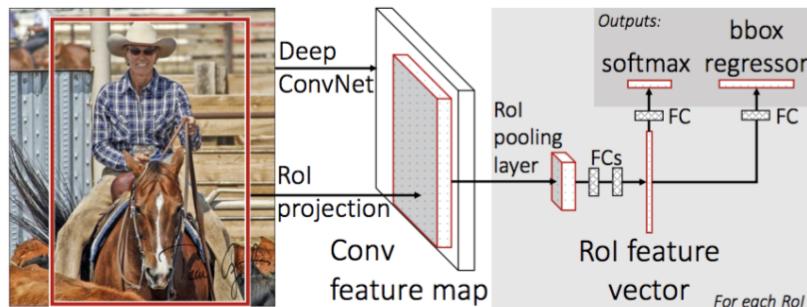


Figura 38: Fast R-CNN

En la arquitectura de Fast R-CNN que se muestra en la figura 38, la primera diferencia que se puede observar es que, la entrada al modelo es la imagen sobre la que detectar los objetos y también, las regiones propuestas. Dentro de la CNN, una capa pooling se encarga de extraer un vector de un tamaño fijo. Cada uno de los vectores de salida de la capa pooling se introduce a una secuencia de capas, una capa softmax (función de activación para problemas multiclase) que produce las confianzas de salida para cada una de las regiones y otra que devuelve las posiciones de las bounding boxes. Pero todavía se utiliza *Selective Search* como el

algoritmo de propuesta de posibles regiones de interés, el cual, puede tardar hasta 2s por imagen y produce una gran cantidad de regiones posibles, lo que provoca una pérdida de rendimiento en el modelo de detección.

- Faster R-CNN

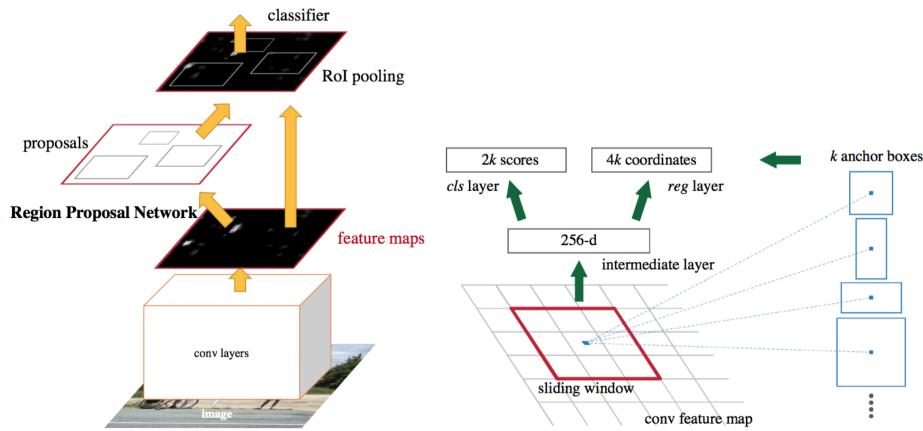


Figura 39: Faster R-CNN

En 2016, propuso un nuevo modelo llamado Faster R-CNN, en el que se integra el proceso de proponer y refinar las regiones de interés dentro del entrenamiento del modelo denominado red de proposición de regiones (RPN). La RPN actúa sobre la misma CNN con la que trabaja Fast R-CNN para extraer la información sobre la imagen original. Para ello, se utiliza una pequeña red que se desplaza sobre la salida de las capas convolucionales del modelo. Esta pequeña red toma como entrada una ventana de dimensiones $n \times n$ sobre la matriz de características recibida como entrada. Cada una de las ventanas se mapea a un vector pequeño (256 elementos o 512 elementos) y cada uno de estos se conecta a dos capas de manera completa, una para generar las bounding boxes (reg) y otra para la probabilidad que la bounding box tenga o no un objeto (cls).



Figura 40: Detección de personas en imagen de dron

La salida del modelo se muestra en la figura 40, correspondiente a una los bluonding box que envuelven a las personas que aparecen en la imagen original tomada desde un dron.

Casos prácticos

En este capítulo, vamos a ver los resultados obtenidos de poner en práctica algunos de los conceptos comentados a lo largo del trabajo.

6.1. Centros de Atención Primaria por Municipios

6.1.1. Captura de información geográfica sobre Municipios

Como vimos en la selección 2.4.3, IDENA es el mayor proveedor de datos geográficos de la Comunidad Foral de Navarra. De toda la información que expone, hemos descargado una capa vectorial con los municipios de Navarra definida en el Catastro. Para ello, hemos empleado dos formas distintas de descargar los datos y hemos empleado dos tecnologías distintas para cargar los datos:

- Descarga de fichero Shapefile y cargar en QGIS
 1. Acceder al cuadro de herramientas del visor web [8].
 2. Ir a la sección “capas disponibles”, en donde se muestra el catálogo de capas que expone IDENA, y seleccionar la que se llama “Municipios de Navarra (Catastro)”.



3. Comprobar que la capa aparece en la sección “capas cargadas” y que se visualiza en el mapa.



4. Exportar la capa desde la sección de “descarga”. Elegimos la opción de capa vectorial y el formato Shapefile.



5. Obtenemos un fichero comprimido que contiene todos los archivos del formato Shapefile, el cual tenemos que descomprimir.
6. Importar la capa en QGIS. “Capa”; “Añadir capa”; “Añadir capa vectorial...”
- Una vez que tenemos cargada la capa en QGIS, podemos visualizar la tabla de atributos y seleccionar los objetos mediante ellos. Como podemos ver en la siguiente tabla, cada municipio, además de su nombre, contiene información sobre su perímetro y el área que ocupa.

	FEATURE	CMUNICIPIO	MUNICIPIO	MUNINOAC	GEOM_AREA	GEOM_PERI	BEGINLIFE
1	200020	194	Valle de Oollo / Ollaran	Valle de Oollo/Ollaran	36978379,89999...	33233,6000000	31/08/2022
2	200020	88	Noáin (Valle de Elorza) / Noain (...	Noain (Valle de Elorza) / Noain (E...	48288771,47999...	36456,8600000	31/08/2022
3	200020	260	Valle de Yerri / Deierri	Valle de Yerri / Deierri	93448585,04999...	77454,9200000	31/08/2022
4	200020	86	Valle de Egüés / Eguesibar	Valle de Egues / Eguesibar	53501197,32999...	37556,5400000	31/08/2022

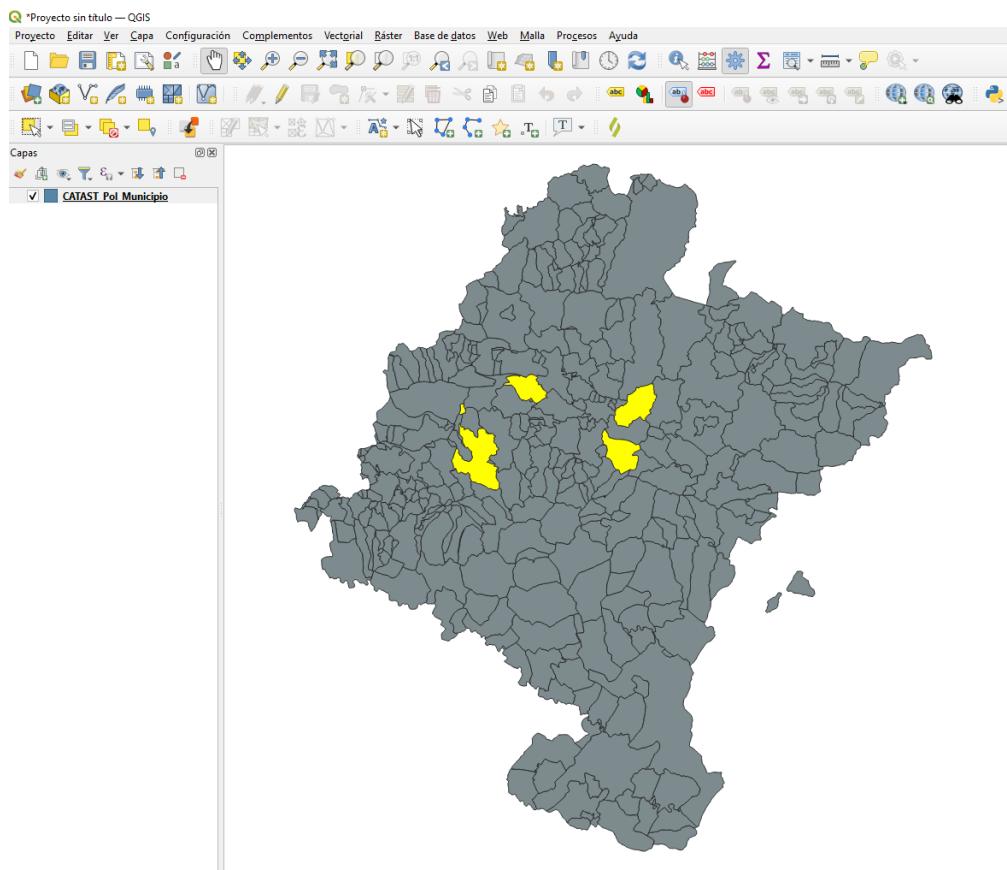


Figura 41: Municipios Navarra visualizados en QGIS

En la figura 41, vemos visualizados en QGIS la capa de los municipios que nos hemos descargado. En este caso, aparecen resaltados en color amarillo aquellos municipios cuyo nombre contiene la palabra “Valle”.

Cabe destacar que la misma capa la podemos descargar en formato KML y cargarla en Google Earth. Aunque la visualización resulta más amigable, Google Earth no dispone de las herramientas para el análisis espacial con las que cuenta QGIS.

- Petición web mediante el protocolo WFS y cargar en GeoDataFrame

Para esta segunda forma, hemos empleado el lenguaje de programación Python para la manipulación de datos geográficos.

1. El primer paso es importar las librerías que vamos a utilizar. Por un lado la librería Request para realizar la petición al servicio WFS de IDENA y por otro lado la librería GeoPandas. Esta última es una ampliación de la biblioteca Pandas, empleada en ciencia de datos, a la que le agrega un soporte para el manejo de datos geoespaciales.

```
[1]: import requests
      import geopandas as gpd
```

2. Realizamos la petición de los municipios de Navarra al servicio WFS de IDENA y recogemos la respuesta en formato JSON.

```
[2]: url = """https://idena.navarra.es/ogc/wfs"""
parameters = {
    'service': 'WFS',
    'version': '2.0.0',
    'typename': 'IDENA:CATAST_Pol_Municipio',
    'srsname': 'EPSG:4326',
    'request': 'getFeature',
    'outputFormat': 'json'
}
response = requests.post(url, data=parameters)
json = response.json()
```

3. Construimos un GeoDataFrame a partir del JSON obtenido. Los GeoDataFrame son estructura en forma de tabla en la que cada fila corresponde a un objeto GeoSeries. Los GeoSeries son vectores que guardan tanto las propiedades geométricas como los atributos de objetos. En nuestro caso, guarda la geometría de cada municipio, junto a los atributos que hemos visto anterior-

mente (nombre, perímetro, área, etc.).

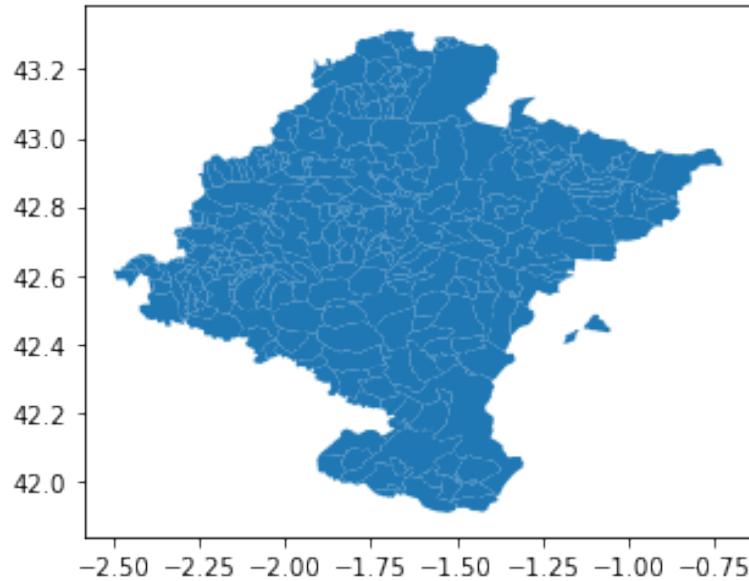
```
[3]: municipiosGDF = gpd.GeoDataFrame.from_features(json["features"])
```

```
[3]:
```

	geometry	FEATURE	CMUNICIPIO	MUNICIPIO	\
190	MULTIPOLYGON (((-1.84177 42.84037, -1.84189 42...))	200020	194	Valle de Oollo / Ollaran	
282	MULTIPOLYGON (((-1.63079 42.77244, -1.63063 42...))	200020	88	Noáin (Valle de Elorz) / Noain <u>u</u>	
297	↪(Elortzibar) MULTIPOLYGON (((-2.03778 42.80587, -2.03807 42...))	200020	260	Valle de Yerri / Deierri	
337	MULTIPOLYGON (((-1.57393 42.83506, -1.57391 42...))	200020	86	Valle de Egüés / Eguésibar	
	MUNINOAC	GEOM_AREA	GEOM_PERI	BEGINLIFE	
190	Valle de Oollo/Ollaran	36978379.90	33233.60	01/09/2022	
282	Noain (Valle de Elorz) / Noain (Elortzibar)	48288771.48	36456.86	01/09/2022	
297	Valle de Yerri / Deierri	93448585.05	77454.92	01/09/2022	
337	Valle de Egüés / Eguésibar	53501197.33	37556.54	01/09/2022	

4. Visualizamos los municipios.

```
[4]: municipiosGDF.plot()
```



6.1.2. Añadir capas de Centros de Atención Primaria

El primer paso es la descarga de la capa vectorial, correspondiente a las localizaciones de los centros de atención primaria de Navarra. Para ello, hacemos la petición al servicio WFS de IDENA desde código Python, al igual que con los municipios.

```
[5]: url = """https://idena.navarra.es/ogc/wfs"""
parameters = {
    'service': 'WFS',
    'version': '2.0.0',
    'typename': 'IDENA:DOTACI_Sym_SNSPrimaria',
    'srsname': 'EPSG:4326',
    'request': 'getFeature',
    'outputFormat': 'json'
}
response = requests.post(url, data=parameters)
json = response.json()
centrosAtencionPrimariaGDF = gpd.GeoDataFrame.from_features(json["features"])
centrosAtencionPrimariaGDF.head()
```

Mostramos algunos ejemplos de centros de salud. Vemos que estos presentan una geometría en forma de Punto (POINT), al contrario que los municipios, que podían estar formados por uno o varios polígonos (MULTIPOLYGON).

	geometry	FEATURE	IDCENSAN	CENSAN	CZONA	ZONA	CENTSINGDP
0	POINT (-1.60207 42.05893)	7400025	00001	Centro de Salud de Tudela Este	46	TUDELA ESTE	802
1	POINT (-1.61057 42.06222)	7400025	00002	Centro de Salud de Tudela Oeste	45	TUDELA OESTE	802
2	POINT (-1.68023 42.00230)	7400025	00003	Centro de Salud de CASCANTE	50	CASCANTE	238
3	POINT (-1.44259 41.97833)	7400025	00004	Centro de Salud de Buñuel	51	BUÑUEL	223
4	POINT (-1.80554 42.08284)	7400025	00005	Centro de Salud de Cintruénigo	49	CINTRUÉNIGO	244
	POBLACION	DIRECCION	CODPOSTAL	X25830	Y25830	BEGINLIFE	
0	TUDELA	JUAN A. FERNANDEZ, 12	31500	615667.221	4657264.89	17/06/2019	
1	TUDELA	GAYARRE, 17	31500	614958.282	4657617.90	17/06/2019	
2	CASCANTE	AVDA. CARIDAD, S/N	31520	609297.095	4650873.88	17/06/2019	
3	BUÑUEL	CRISTOBAL COLON, 19	31540	629026.275	4648543.31	17/06/2019	
4	CINTRUENIGO	RIBERA, 2	31592	598794.444	4659663.89	17/06/2019	

Generamos un campo nuevo que indique si el municipio cuneta con algún centro de atención primaria.

```
[6]: municipiosGDF['TieneCentro'] = [centrosAtencionPrimariaGDF.within(geo).any() for key, geo in municipiosGDF.geometry.items()]
```

6.1.3. Resultado final

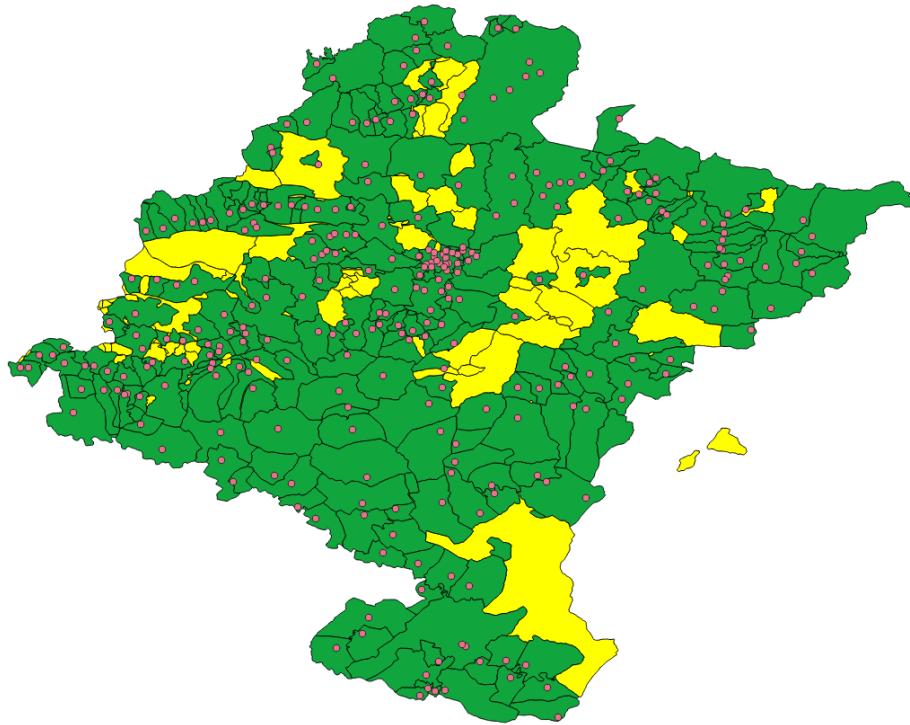


Figura 42: Municipios sin Centro de Atención Primaria

La figura 42 muestra sobre el mapa de Navarra los puntos en el que se localizan todos los centro de atención primaria. Los municipios que no tienen ninguno aparecen en color amarillo, mientras que los municipios que tiene al menos un centro de atención primaria aparecen en color verde.

Podemos obtener los 10 municipios con mayor extensión, es decir, mayor área, que carecen de centro de atención primaria.

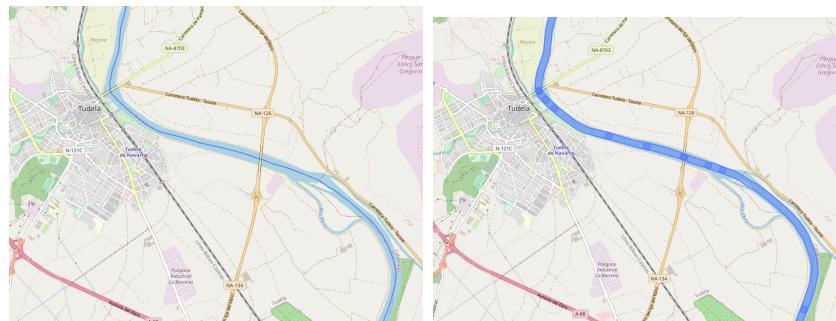
	MUNICIPIO	GEOM_AREA	TieneCentro
172	Bardenas Reales	4.184495e+08	False
152	Arce / Artzi	1.463562e+08	False
188	Sierra de Urbasa	1.144517e+08	False
287	Larraun	1.077661e+08	False
195	Leoz / Leotz	9.622492e+07	False
137	Romanzado / Errromantzatua	9.169286e+07	False
291	Lónguida / Longida	9.071720e+07	False
294	Lizoain-Arriasgoiti / Lizoainibar-Arriasgoiti	6.523998e+07	False
295	Izagondoa	5.960535e+07	False
238	Ibargoiti	5.405204e+07	False

6.2. Río Ebro

6.2.1. Captura y procesado de información sobre ríos

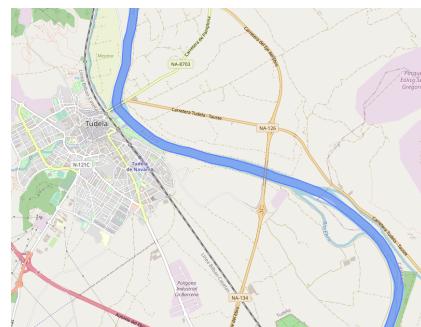
Al igual que en el caso anterior, lo primero es importar las librerías que vamos a utilizar.

```
[1]: import requests  
import geopandas as gpd  
import numpy as np  
from shapely.geometry import box, Polygon  
from PIL import Image, ImageDraw  
import matplotlib.pyplot as plt  
import random  
import io
```



(a) Capa original

(b) Zona buffer



(c) Unión de polígonos

Figura 43: Selección del río Ebro a su paso por Tudela

En esta primera parte hemos cargado la capa de las corrientes principales de Navarra y hemos generado otra con el cauce del río Ebro. Los pasos intermedios se observan en la figura 43 sobre el río Ebro a su paso por Tudela.

- El punto *a* muestra la capa original de IDENA (punto 1.2), que consta de una línea situada en la mitad del cauce del río.
- El punto *b* muestra la zona buffer generada (punto 1.3), en la que se ha aumentado el ancho de la la línea de la capa original, Lo que permite apreciar que la capa original no estaba formada por una sola línea.
- El punto *c* muestra la unión de todas las zonas buffer generadas (punto 1.4)

```
[ ]: # 1.1 Leemos el fichero con la capa de las corrientes naturales de Navarra
riosGDF = gpd.read_file('files/input/HIDROG_Lin_CorrienteNatural.shp')
# 1.2 Seleccionamos las líneas correspondientes al río Ebro
rioEbroGDF = riosGDF.loc[riosGDF.NOMBRE == "Río Ebro"]
# 1.3 Generamos una zona buffer de 60 metros de radio.
rioEbroGDF_buffer = rioEbroGDF.buffer(60.0)
rioEbroGDF.geometry = rioEbroGDF_buffer
# 1.4 Unimos todas las zonas buffer generadas
rioEbroGDF = rioEbroGDF.dissolve(by='NOMBRE')
# 1.5 Modificamos el sistema de referencia
rioEbroGDF = rioEbroGDF.to_crs(epsg=4326)
# 1.6 Obtenemos las coordenadas de los polígonos que forman el río Ebro
ebro_points = np.array([polygon.exterior.coords[:-1] for multipolygon in ↪
    rioEbroGDF.geometry for polygon in multipolygon])
ebro_points = np.concatenate(ebro_points)
```

6.2.2. Descarga de imágenes aéreas

En esta segunda parte, vamos a descargar imágenes aéreas del servicio WMS de IDENA para que nos sirva como mapa de fondo. En concreto, vamos a emplear el mapa base con ortofoto de máxima actualidad (año 2021). Las ortofotografías con imágenes obtenidas a partir de un vuelo digital, en este caso a una altura comprendida entre los 5200 y 7200 metros.

Definimos los parámetros de la petición del mapa, entre los cuales pasamos un bounding box (BBOX) que limita la descarga a la zona de terreno que envuelve.

```
[139]: url = """https://idena.navarra.es/ogc/wms"""
parameters = {
    'service': 'WMS',
    'version': '2.0.0',
    'LAYERS': 'IDENA:ortofoto_maxima_actualidad',
    'CRS': 'EPSG:4326',
    'request': 'getMap',
    'format': 'image/png',
    'BBOX': '{lon_min,lat_min,lon_max,lat_max}',
    'WIDTH': '256',
    'HEIGHT': '256'
}
```

También hemos definido un par de funciones que usaremos en el solapamiento del mapa base con la capa del río Ebro.

```
[159]: # Obtiene un bounding box a partir del punto central y un margen a este
def get_bbox_coord(point, grow):
    lon_min = point[0] - grow
    lat_min = point[1] - grow
    lon_max = point[0] + grow
    lat_max = point[1] + grow
    return [lon_min, lat_min, lon_max, lat_max]
```

```

# Convierte las coordenadas geográficas a coordenadas de la imagen
def convert_latlon_pxy(latitude, longitude, img_bbox, image):
    coord = np.array([latitude, longitude])
    geo_origin = np.array([img_bbox[1], img_bbox[0]])
    geo_distance = [img_bbox[2] - img_bbox[0], img_bbox[3] - img_bbox[1]]
    img_distance = [image.width, image.height]
    pxy = np.flip((np.subtract(coord, geo_origin) * img_distance) /
    ↪geo_distance)
    return tuple(np.subtract(np.array([2 * pxy[0], 256]), pxy))

```



Figura 44: Selección del río Ebro en distintos tramos

El siguiente código genera como resultado las imágenes mostradas en la figura 44, en las que se muestra el cauce del río Ebro seleccionado (capa elaborada en la primera parte) sobre el mapa base con ortofoto.

```
[177]: img_grow = 0.01
# 2.1 Seleccionar aleatoriamente dos puntos de la capa del río Ebro
for i, point in enumerate(random.choices(ebro_points, k=2)):
    try:
        # 2.2 Generar bounding box a partir de un punto del río ebro
        img_bbox_coord = get_bbox_coord(point, img_grow)

        # 2.3 Descarga de la imagen del servicio WMS de IDENA
        parameters['BBOX'] = ",".join(str(coord) for coord in img_bbox_coord)
        response = requests.get(url, params=parameters, stream=True)
        img = Image.open(io.BytesIO(response.content))

        # 2.4 Generar intersección entre el bbox y la capa del río Ebro
        lon_min, lat_min, lon_max, lat_max = img_bbox_coord
        img_bbox = gpd.GeoSeries([Polygon([(lon_min, lat_max), (lon_max, lat_max),
                                         (lon_max, lat_min), (lon_min, lat_min)])])
        img_bbox_gdf = gpd.GeoDataFrame({'geometry': img_bbox})
        img_bbox_gdf = img_bbox_gdf.set_crs(epsg = 4326)
        intersectionGDF = rioEbroGDF.overlay(img_bbox_gdf, how='intersection')

        # 2.5 Añadir la intersección obtenida en el mapa base
        draw = ImageDraw.Draw(img, 'RGBA')
        poly_coords = intersectionGDF.geometry[0].exterior.coords[:-1]
        river_coord = [convert_latlon_pxpy(poly_coord[1], poly_coord[0],
                                         img_bbox_coord, img) for poly_coord in poly_coords]
        draw.polygon(river_coord, fill=(255, 0, 255, 50), outline=(0,0,0,255))

        # 2.6 Mostrar los resultados
        plt.figure(figsize=(8, 6))
        plt.imshow(img)
        plt.axis('off')
    except Exception as err:
        print(err)
        continue
```

Conclusiones y líneas futuras

7.1. Conclusiones

El mundo de los Sistemas de información Geográfica es muy extenso y se relaciona con otros muchos campos. En este trabajo hemos visto una pequeña parte de su potencial para el análisis espacial y algunos de los modelos más recientes de aprendizaje automático y aprendizaje profundo. Tanto GIS como la AI son campos en proceso de expansión y su intersección, la GeoAI, resulta necesaria para analizar el gran volumen de datos espaciales que existen en la actualidad. En las primeras fases de comercialización de los GIS se daba más importancia a la creación de un software robusto y que abarcara la resolución de la mayoría de los problemas. En estos últimos años, los esfuerzos se han centrado en el tratamiento de los grandes volúmenes de datos espaciales que se generan y por ello actualmente los GIS tienen una estrecha relación con campos como la Ciencias de Datos. Los lenguajes de programación, como R o Python, ofrecen un entorno de programación espacial que resulta más cómodo para la manipulación y análisis de datos espaciales. Las herramientas GIS, como QGIS o ArcGIS, permiten realizar prácticamente las mismas operaciones sobre los datos, pero aportan más valor que los entornos de programación a la hora de filtrar, seleccionar y visualizar datos espaciales.

7.2. Líneas futuras

Las tecnologías que han sido objeto de investigación en este trabajo permiten continuar con su investigación tomando distintos caminos. Algunos de ellos son:

- Conocer nuevas fuentes de datos espaciales y gestionar la información empleando distintas bases de datos espaciales.
- Conocer y aplicar más métodos de análisis espacial.
- Conocer e implementar más modelos de Inteligencia Artificial aplicados en el ámbito geoespacial.
- Adentrar en el mundo de la Teledetección y emplear algoritmos de superresolución a imágenes satelitales, con el fin de obtener mejores resultados en modelos de aprendizaje profundo.

Bibliografía

- [1] Parlamento Europeo, “Directiva 2007/2/CE del Parlamento Europeo y del Consejo,” mar 2007.
- [2] M. Gutierrez Puebla, J. y Gould, *SIG: Sistemas de Información Geográfica*. 1. ed. ed., nov 1994.
- [3] D. A. D. of GIS Services with AirPhotoUSA, “The components of gis evolve - gis lounge,” 2006.
- [4] M. Lupp, “Open geospatial consortium,” *Encyclopedia of GIS*, 2016.
- [5] “Signa.” <https://signa.ign.es/signa/>.
- [6] “Geoportal.” <https://sig.mapama.gob.es/geoportal/>.
- [7] “Enaire drones.” <https://drones.enaire.es/>.
- [8] “Idena.” <https://idena.navarra.es/navegar/>.
- [9] “Requisitos del sistema de ArcGIS Desktop 10.8.x.” <https://desktop.arcgis.com/es/system-requirements/latest/arcgis-desktop-system-requirements.htm>.
- [10] I. A. Fernández, “El datum,” *Universidad de Valladolid*, 2001.
- [11] BOE, “Real decreto 1071/2007, de 27 de julio, por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España..,” *Boe*, vol. 207, 2007.
- [12] “Spatial reference list – spatial reference.” <https://spatialreference.org/ref/>.
- [13] W. R. Tobler, “A computer movie simulating urban growth in the detroit region,” *Economic Geography*, vol. 46, 1970.
- [14] T. C. Media, “Executive summary the value of location in business location analytics provides more than visualization exposing new data insights across the organization dispelling myths seven key characteristics of an effective location analytics solution,” 2012.

- [15] "Application of geospatial artificial intelligence to environmental epidemiology." <https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/20719/Mazzola%20Ortega%20Mart%C3%9Dn%20Ignacio%20Memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [16] "Image classification using svm (92<https://www.kaggle.com/code/ashutoshvarma/image-classification-using-svm-92-accuracy/notebook>. 92".
- [17] "Year in review 2021: Deep learning in arcgis." <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/arcgis/imagery/year-in-review-2021-deep-learning-in-arcgis/>.
- [18] B. K. G. Büttner and G. H. S. Arnold, "Updated clc illustrated nomenclature guidelines,"
- [19] O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox, "U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation," vol. 9351, 2015.
- [20] "Up-sampling with transposed convolution | by nao-ki | medium." <https://naokishibuya.medium.com/up-sampling-with-transposed-convolution-9ae4f2df52d0>.