



UNIVERSIDAD AGRARIA DE LA HABANA
"Fructuoso Rodríguez Pérez"

FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MÁSTER EN BIOMATEMÁTICA

Integración de distintas fuentes de datos en un Sistema de Información Geográfica

Autor: Gabriel Alberto Pérez Guerra

MAYABEQUE, 2022



UNIVERSIDAD AGRARIA DE LA HABANA
“Fructuoso Rodríguez Pérez”

FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MÁSTER EN BIOMATEMÁTICA

Integración de distintas fuentes de datos en un Sistema de Información Geográfica

Autor: Gabriel Alberto Pérez Guerra

Tutoras: Dra.C Neili Machado García

Dra.C María Elena Ruiz Pérez

MAYABEQUE, 2022

Resumen

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ofrecen un entorno capaz de integrar, almacenar, editar, analizar, compartir y mostrar la información geográficamente referenciada. En este trabajo se describen los conceptos básicos de un SIG, se selecciona el más adecuado y se señalan sus usos en la agricultura. Se muestran las formas de representación de los datos, así como el uso de los principales programas de bases de datos espaciales actuales para el almacenamiento de la información espacial. Se desarrolló una infraestructura de software compuesta por PostgreSQL (con su extensión PostGIS para la gestión de objetos espaciales), QGIS para visualizar la información espacial y la aplicación desarrollada geoDataImporter. Esta infraestructura permitió el procesamiento y almacenamiento de los datos contenidos en los ficheros de información espacial con formato SHP, KML y OSM en una base de datos espacial, así como su posterior visualización en el SIG QGIS. Además, esta infraestructura permitió el almacenamiento de los datos del clima con formato JSON provenientes del Instituto de Meteorología (INSMET). Esta infraestructura fue empleada en la Unidad Docente Productiva (UDP) “El Guayabal” para comprobar el uso y funcionamiento de esa infraestructura, donde se geolocalizaron las diferentes áreas de producción agrícola y la utilización de las mismas a lo largo del año 2022, el área que abarca la máquina de riego, así como los datos del suelo proporcionados por el Departamento de Suelo de la UNAH.

Palabras clave: Sistema de información geográfica; base de datos espacial; representación de datos espaciales; herramienta de desarrollo SIG.

Abatract

Geographic Information Systems (GIS) offer an environment capable of integrating, storing, editing, analyzing, sharing and displaying geographically referenced information. In this paper the basic concepts of a GIS are described, the most appropriate one is selected and its uses in agriculture are pointed out. The forms of data representation are shown, as well as the use of the main current spatial database programs for storing spatial information. A software infrastructure composed of PostgreSQL (with its PostGIS extension for spatial object management), QGIS to visualize spatial information and the geoDataImporter developed application was developed. This infrastructure allowed the processing and storage of the data contained in the spatial information files with SHP, KML and OSM formats in a spatial database, as well as its subsequent visualization in the GIS QGIS. In addition, this infrastructure allowed the storage of climate data in JSON format from the Institute of Meteorology (INSMET). This infrastructure was used in the Productive Teaching Unit (UDP) "El Guayabal" to verify the use and operation of this infrastructure, where the different areas of agricultural production were geolocated and their use throughout the year 2022, the area that includes the irrigation machine, as well as the soil data provided by the UNAH Soil Department.

Keywords: Geographic information system; spatial database; representation of spatial data; GIS development tool.

Índice

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	5
1.1. Introducción	5
1.2. Conceptos básicos	5
1.2.1. Conceptos básicos referentes al espacio geográfico	5
1.2.2. Conceptos básicos referentes a los objetos	6
1.3. Representación de datos en un SIG	9
1.4. Los SIG y las Bases de Datos Espaciales (BDE)	12
1.5. Herramientas de desarrollo SIG	16
1.6. Fuentes para adicionar información espacial en las bases de datos PostgreSQL	19
1.7. Aplicaciones de los SIG en la agricultura	21
1.8. Conclusiones	24
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS	26
2.1. Introducción	26
2.2. Caracterización del área de estudio	26
2.3. Procesamiento de los ficheros espaciales y datos climáticos	28
2.4. Otras Herramientas informáticas empleadas	29
CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
3.1. Introducción	31
3.2. Infraestructura de software para el almacenamiento y visualización de información espacial	31

3.3.	Despliegue de la infraestructura de software en los servidores de la UNAH	33
3.4.	Uso de la infraestructura diseñada	34
3.4.1.	Proceso de obtención de información geográfica de la UDP “El Guayabal”	34
3.4.2.	Proceso de importación de los datos geográficos utilizando <i>goeDataImporter</i>	36
3.4.3.	Visualización de la información importada en la base de datos	38
3.4.4.	Visualización de la información de la base de datos en QGIS	40
CONCLUSIONES		44
RECOMENDACIONES		45
BIBLIOGRAFÍA		46

Índice de figuras

FIGURA 1: EJEMPLO DE OBJETOS GEOGRÁFICOS A DIFERENTES ESCALAS. FUENTE: BRISABOA <i>ET AL.</i> (2000).	8
FIGURA 2: EJEMPLO DE OBJETOS GEOGRÁFICOS A DIFERENTES ESCALAS Y TIPOS.	8
FIGURA 3: REPRESENTACIÓN VISUAL DE VARIAS CAPAS DE DATOS EN UN SIG. FUENTE: ZHOU (2021).	9
FIGURA 4: REPRESENTACIÓN UTILIZANDO EL MODELO RASTER DE UN LAGO. FUENTE: MACARTHUR (2002).	10
FIGURA 5: REPRESENTACIÓN UTILIZANDO EL MODELO VECTORIAL DE UN LAGO. FUENTE: MACARTHUR (2002).	10
FIGURA 6: DIFERENTES TIPOS DE SOFTWARE SIG. FUENTE: STEINIGER <i>ET AL.</i> (2010).	17
FIGURA 8: EJEMPLO DEL FICHERO QUE CONTIENE LOS DATOS DEL ESTADO DEL TIEMPO.	29
FIGURA 7: DIAGRAMA DE LA INFRAESTRUCTURA PROPUESTA.	32
FIGURA 9: MAPEO DE LAS ÁREAS PRODUCTIVAS DE LA UDP GUAYABAL UTILIZANDO LA HERRAMIENTA <i>FIELDS AREA MEASURE PRO</i> .	35
FIGURA 10: EJEMPLO DE SUBIDA DE UN FICHERO SHP UTILIZANDO EL SERVICIO API-REST CON POSTMAN.	36
FIGURA 11: EJEMPLO DE SUBIDA DE UN FICHERO KML UTILIZANDO EL SERVICIO API-REST CON POSTMAN.	37
FIGURA 12: EJEMPLO DEL ENVÍO DE LA INFORMACIÓN CLIMÁTICA UTILIZANDO EL SERVICIO API-REST CON POSTMAN.	38
FIGURA 13: VISUALIZACIÓN DE LA TABLA “AREAS AGRICOLAS GUAYABAL 2022-07-05 12 24” QUE FUE IMPORTADA DESDE EL FICHERO SHP EN PGADMIN.	39
FIGURA 14: VISUALIZACIÓN DE LA TABLA “WEATHER” QUE CONTIENE LOS DATOS DEL CLIMA DE AGOSTO-SEPTIEMBRE DE 2022..	40
FIGURA 15: EJEMPLO DE VISUALIZACIÓN EN QGIS LAS CAPAS ESPACIALES ALMACENADAS EN POSTGRESQL.	41
FIGURA 16: EJEMPLO DE VISUALIZACIÓN EN QGIS DE LAS CAPAS DE TIPOS DE SUELO Y ÁREAS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA PRESENTES EN LA UDP.	42
FIGURA 17: VISUALIZACIÓN DEL ESTADO DEL TIEMPO DE UNA FECHA ESPECÍFICA EN QGIS.	43

Introducción

La revolución tecnológica de las últimas décadas se debe a los avances producidos en los campos de la informática y la comunicación. Estos cambios han inducido a la sociedad actual a la universalización de las nuevas tecnologías, así como la generalización de las redes de comunicación y la globalización de la información. El uso de la información espacial para georreferenciar elementos en mapas digitales ha marcado una pauta para el análisis y visualización de los datos.

El uso de estas técnicas ha dotado a los profesionales con la capacidad de crear sus propios mapas digitales y representar información sobre el mundo real de una manera visual. Estas técnicas también revelan patrones, tendencias y relaciones sobre cualquier elemento que tenga un contexto geoespacial. Se han convertido en poderosos sistemas para la elaboración, mantenimiento y visualización de información espacial, dando paso a los conocidos Sistemas de información Geográfica (SIG) (Zhou, 2021).

Los SIG son sistemas compuestos por hardware, software y procedimientos para capturar, manejar, manipular, analizar, modelizar y representar datos georreferenciados, con el objetivo de resolver problemas de gestión y planificación (Goodchild y Kemp, 1990). Los SIG son un marco para reunir, gestionar y analizar datos. Particularmente en la ciencia de la geografía los SIG, integran muchos tipos de datos. Analiza la ubicación espacial y organiza capas de información en visualizaciones usando mapas y escenas 3D. Con esta capacidad única, los SIG revelan conocimientos más profundos de los datos, como patrones, relaciones y situaciones, ayudando a los usuarios a tomar decisiones más inteligentes.

Investigadores a lo largo del mundo utilizan los SIG en sus trabajos como Singh (2019); Nowak *et al.* (2020); Ayad *et al.* (2021) y Taloor *et al.* (2022), entre otros. Empresas tales como IBM, Esri, Microsoft, Amazon, e-Bay, entre muchas otras han incorporado servicios de localización a su portafolio. Esto ha permitido aumentar sus ventas y definir estrategias de propaganda diferenciada de acuerdo a las áreas geográficas para promover sus productos.

En la agricultura, los SIG juegan un papel fundamental ya que posibilitan la clasificación, el mapeo y la cartografía de cultivos con información georreferenciada, la identificación de etapas fenológicas de las plantas, el monitoreo del riego y la predicción de rendimientos. Todo ello basado, fundamentalmente, en fuentes de información como las imágenes satelitales, la fotogrametría aérea y los datos de cosecha de las maquinarias agrícolas (Pérez-García *et al.*, 2019). Investigaciones como la de Bill *et al.* (2012); Sharma *et al.* (2018); Budiharto *et al.* (2019) y Dunaieva *et al.* (2019), entre otras, son ejemplos de la aplicación de los SIG en la agricultura. Empresas como Agrosap, SGS España, SmartRural, Agrodron, Hemav, SKYDRON, entre otras, se han sumado a la aplicación de novedosas herramientas de localización y almacenamiento de información espacial fomentando el uso de los SIG.

En Cuba han sido realizadas varias investigaciones sobre su aplicación en diversas esferas de la sociedad como la salud, medio ambiente, minería, sistema eléctrico, entre otros. Se pueden mencionar los trabajos de Núñez y Manuel (2006); Lao Ramos y Peláez Hernández (2018); Pérez-García *et al.* (2019) y Sánchez Fleitas *et al.* (2019). Empresas cubanas como GeoCuba, CIMEX (Corporación de Importadores y Exportadores de Cuba) o CUPET (Cuba Petróleo), por citar algunos ejemplos, han adoptado el uso de software SIG en su quehacer diario. GeoCuba brinda soluciones en las esferas de la información geográfica, dando servicios de localización a diversas entidades estatales, así como la cartografía de la isla. CIMEX, por otro lado, utiliza los SIG para localizar las rutas de entregas virtuales de sus clientes en la plataforma TuEnvío. CUPET, a su vez, utiliza las posibilidades de los SIG para localizar los yacimientos petrolíferos de la isla, áreas exploradas y en explotación.

Por otro lado, algunas investigaciones cubanas se han enfocado en la aplicación de estas herramientas en la agricultura. Se pueden citar los trabajos de Lau Quan *et al.* (2005); Esquivel *et al.* (2008); Rojas-Martínez *et al.* (2014); Benítez-Puig y Viñas-Quintero (2018); Pérez-García *et al.* (2019) y Chinea-Horta *et al.* (2022), entre otros. En estos trabajos, han sido aplicadas las funcionalidades brindadas por los

softwares SIG para la siembra de caña, el uso racional del agua, la agricultura de precisión, etc.

La Unidad Docente Productiva (UDP) “El Guayabal”, ubicada en San José de Las Lajas posee áreas de producción agrícola centradas fundamentalmente en mostrar la aplicación de la ciencia y la tecnología en el campo agrario. En estas áreas, se llevan a cabo investigaciones que contribuyen a la formación teórica y práctica de estudiantes y al mejoramiento de la producción de alimentos.

A pesar del desarrollo de la granja la utilización de herramientas informáticas que permitan un análisis de sus resultados es incipiente. Carecen de documentación suficiente para realizar un análisis histórico de la localización de los cultivos y una actualización del catastro del suelo. Asimismo, cuentan solamente con documentos de producción que carecen de la geo localización espacial de los campos donde fueron sembrados dichos cultivos para obtener la cosecha alcanzada. Esto impide realizar estudios históricos para determinar el aprovechamiento de los suelos y comprobar si la siembra se está realizando adecuadamente a las características de estos y si se están obteniendo los rendimientos que se esperan. Además, es importante destacar que toda la información disponible se encuentra en formato de papel y han sido registradas de forma empírica, lo cual impide los estudios anteriormente señalados.

La implementación de un SIG en Guayabal para la localización de las áreas de producción agrícola, que permita a su vez, referenciar las informaciones que son generadas en este centro, sería de gran ayuda para la toma de decisiones de sus directivos. El proceso de obtención y recolección de información geográfica existente o nueva, estaría condicionado por los formatos en los que estos se pueden encontrar. De ahí que sea necesaria la definición de una infraestructura de software que permita la asimilación y almacenamiento de información de distintas fuentes y formatos, y a su vez, que permita el acceso a esta información por parte de los directivos, estudiantes y profesores. Todo esto contribuiría al mejoramiento de la formación científica y el aprovechamiento de las áreas productivas.

Lo anteriormente descrito revela el siguiente **problema**: ¿Cómo integrar la información de los datos geográficos provenientes de fuentes de diferentes procedencias y estructura en un SIG para la UDP “El Guayabal”?

La investigación tiene como **objeto de estudio**: las herramientas que permiten integrar bases de datos con características diferentes en un SIG.

Para la realización de esta investigación se propone como **hipótesis** que la creación de un nuevo mecanismo de integración de datos geográficos de diferente procedencia y estructura en un SIG de forma automatizada facilitaría la actualización de los datos en el sistema, así como un mejoramiento en el aprovechamiento de las áreas productivas de la UDP “El Guayabal”.

La presente investigación se sustenta en la **línea de investigación** de Agrofísica y Geoinformática en la Agricultura.

Para resolver el problema se traza el siguiente **objetivo general**: Desarrollar una infraestructura capaz de integrar datos geográficos de fuentes heterogéneas en un SIG.

Asimismo, se denotan los siguientes **objetivos específicos**:

- Seleccionar el SIG adecuado para la visualización de la información espacial disponible en la UDP Guayabal.
- Seleccionar el mecanismo de almacenamiento de información más adecuado para el SIG seleccionado.
- Determinar las diferentes fuentes de información disponibles que nutrirán el mecanismo de almacenamiento.
- Crear una infraestructura para la asimilación de información espacial desde las diferentes fuentes.

Capítulo I: Fundamentación Teórica

1.1. Introducción

En este capítulo se presentan los conceptos básicos de los SIG, se muestran las formas de representación de los datos, así como el uso de los principales softwares de bases de datos espaciales más usadas en la actualidad. Se analizan varios trabajos que establecen comparaciones entre los principales sistemas de información geográficas existentes. Por último, se aborda el uso de los sistemas de información geográfica en la agricultura.

1.2. Conceptos básicos

Cuando se habla de las características y funcionalidades de los SIG es importante tener claro con anterioridad algunos conceptos básicos sobre las características de la información que éstos manipulan. La información de tipo geográfico puede clasificarse en dos categorías: atributos referentes al espacio geográfico y atributos referentes a las propiedades de los objetos).

1.2.1. Conceptos básicos referentes al espacio geográfico

El espacio geográfico se define como el espacio de coordenadas en el que los datos geográficos son representados, el cual suele ser o bien cartesiano (en caso de que el SIG utilice un modelo plano del mundo) o bien geodésico. Sobre este espacio geográfico se puede almacenar cierta información, consistente en atributos alfanuméricos, los cuales se asocian a cada punto del espacio (Brisaboa *et al.*, 2000).

Esta información que se almacena sobre el espacio geográfico es lo que se denomina atributos del espacio geográfico (en adelante AEG). Un AEG puede ser continuo (si el valor asociado a los puntos del espacio puede variar de modo gradual a lo largo del espacio geográfico) o discreto (si el conjunto de valores que puede tomar el atributo asociado al espacio geográfico es discreto). Un ejemplo de AEG discreto es el tipo de cultivo, mientras que un ejemplo de atributo continuo sería la salinidad del suelo, la temperatura o la presión atmosférica.

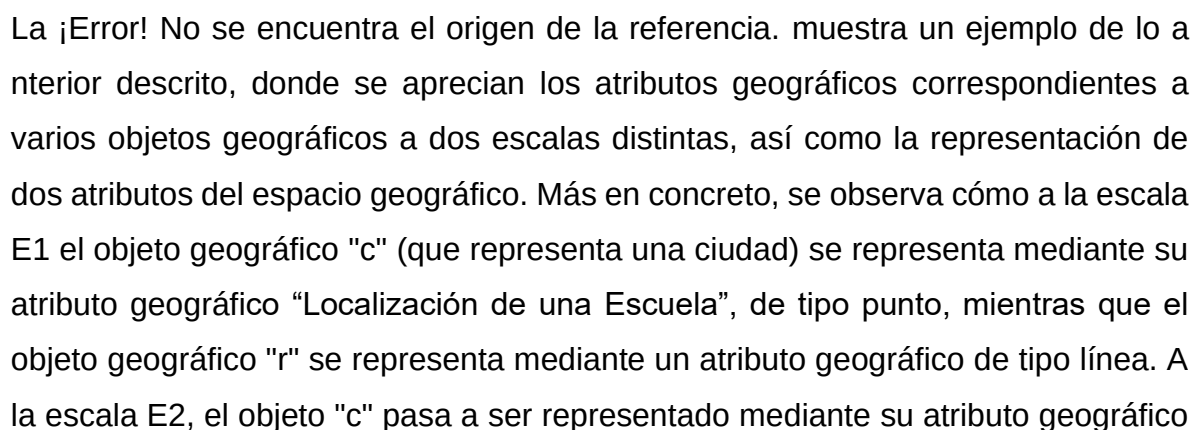
1.2.2. Conceptos básicos referentes a los objetos

Según Brisaboa *et al.* (2000) sobre el espacio geográfico se representan los objetos geográficos, que son objetos que el SIG debe manejar y representar gráficamente. Así se tienen:

- Objeto o entidad geográfica. Es un objeto sobre el que la aplicación SIG guarda no sólo información alfanumérica sino también información geográfica que permita representarlo gráficamente sobre un mapa. Por ejemplo, si se considera el objeto geográfico "Localidad de San José de Las Lajas", además de atributos alfanuméricos como el "nombre", "población", etc. puede tener un atributo geográfico "Localización de la UDP El Guayabal" que represente la posición de la UDP "El Guayabal" y otro atributo geográfico "área" que represente el área del espacio geográfico ocupada por la misma. En el momento de visualización el SIG puede, por ejemplo, utilizar el atributo "Localización de la UDP El Guayabal" para representar la localidad en presentaciones a escala 1:25.000 o menor, y utiliza el atributo "área" para representar a la localidad en presentaciones a escalas mayores, donde esta información puede ser más útil. Es conveniente no confundir aquí la escala de visualización con la precisión de la representación de los atributos geográficos, que es la resolución con la que la información geográfica es almacenada en el SIG.
- Atributo geográfico. Es un atributo que representa información referente a una característica geográfica del objeto al que pertenece (posición, extensión, topología etc.). Es un subconjunto no vacío y posiblemente infinito del espacio geográfico. Los atributos geográficos se representan mediante figuras geográficas, y su tipo se corresponde con el tipo de figura geográfica que se utiliza para representarlo.
- Figura geográfica. Se usan para representar sobre el plano de forma gráfica atributos geográficos de un objeto. En el dominio de los SIG se utilizan diversos tipos de figuras geográficas, siendo las más comunes las siguientes:
 - Punto: El valor de una figura geográfica de este tipo se corresponde con un elemento (punto) del espacio geográfico. Un ejemplo de atributo geográfico

representable mediante una figura geográfica de este tipo es la posición de un objeto, como por ejemplo la localización geográfica de una oficina de correos.

- Línea: Una figura geográfica de este tipo se corresponde con un conjunto de curvas en el espacio geográfico, donde una curva es una secuencia de puntos del espacio contiguos. Un ejemplo de atributos geográficos que pueden ser representados mediante una línea es el curso de un río o el trazado de una carretera.
- Región: El valor de una figura geográfica de este tipo se corresponde con un conjunto de áreas del espacio geográfico. Ejemplos de atributos geográficos representables mediante una región son el área del espacio ocupada por una parcela de terreno o la zona de un país afectada por las nevadas en un día dado.
- Geográfico: El valor de una figura geográfica de este tipo se corresponde con un conjunto de puntos y/o líneas y/o regiones del espacio geográfico. Aunque menos usado que los anteriores, este tipo de figura geográfica también es de utilidad en ciertos dominios de aplicación para representar atributos geográficos.
- Partición: Una figura geográfica de este tipo representa un elemento de una partición del espacio geográfico en áreas disjuntas. Un ejemplo de atributo geográfico de tipo partición es el área de una escuela de una provincia, en la que los ayuntamientos no pueden superponerse y el área ocupada por el conjunto de todos sus municipios ha de coincidir exactamente con toda el área de la provincia.

La  ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. muestra un ejemplo de lo anterior descrito, donde se aprecian los atributos geográficos correspondientes a varios objetos geográficos a dos escalas distintas, así como la representación de dos atributos del espacio geográfico. Más en concreto, se observa cómo a la escala E1 el objeto geográfico "c" (que representa una ciudad) se representa mediante su atributo geográfico "Localización de una Escuela", de tipo punto, mientras que el objeto geográfico "r" se representa mediante un atributo geográfico de tipo línea. A la escala E2, el objeto "c" pasa a ser representado mediante su atributo geográfico

“área”, de tipo región, mientras que "r" continúa representándose mediante el mismo atributo de tipo línea (aunque aquí con más detalle en su curso). A esta escala E2 puede verse además el atributo del espacio geográfico (AEG) discreto “tipo de suelo”, que divide el espacio en cuatro regiones con valores ts1, ts2, ts3 y ts4 respectivamente, y el AEG continuo "salinidad" (colores más oscuros representan valores de salinidad del suelo más baja). En el caso de la ~~¡Error! No se encuentra e~~ l origen de la referencia. se puede observar algo similar, un objeto geográfico de tipo punto que representa una propiedad y a medida que se va aumentando la escala el objeto pasa a convertirse de un punto a un área. En esta figura también se puede observar un nuevo tipo de mapa sobre una imagen satelital.

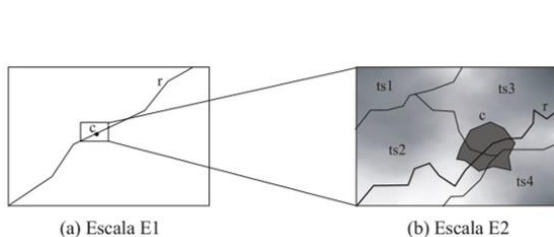


Figura 1: Ejemplo de objetos geográficos a diferentes escalas. Fuente: Brisaboa *et al.* (2000).

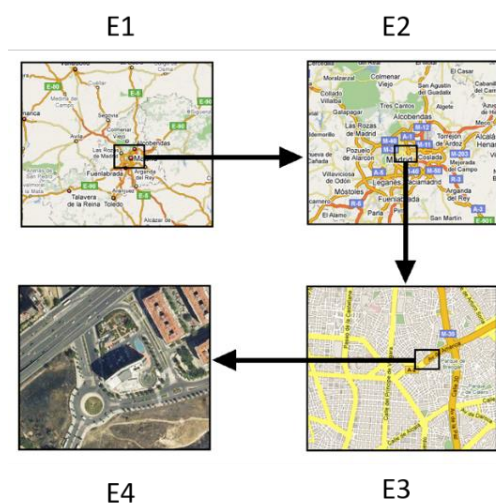


Figura 2: Ejemplo de objetos geográficos a diferentes escalas y tipos.

En el software SIG, los objetos geográficos que tienen la misma representación geométrica y de atributos suelen agruparse en las llamadas "capas" para simplificar las tareas de gestión de datos. Por ejemplo, todos los edificios que están representados por polígonos y tienen información sobre el propietario y el año de construcción se agrupan en una capa de "edificios" (Steiniger *et al.*, 2010).

Un SIG puede estar constituido por varias capas de datos que permiten complementar el mapa del terreno. Estas capas contienen objetos geográficos que responden a una información específica del área. La **Figura 3** muestra la

extrapolación de varias capas de datos en un mapa, en este caso se tienen los datos de calles, edificios y vegetación. Con esta información es posible comprender situaciones que se puedan dar en regiones del terreno, por ejemplo, el terreno que es atravesado por un río será más húmedo que un terreno llano alejado de este. Con la información del tipo de suelo presente en el área puede que no sea posible llegar a esta conclusión, sin embargo, la extrapolación de las capas permite analizar situaciones como esta. Por tal motivo, a la hora de realizar análisis mientras más información del terreno se tenga más preciso será el resultado.

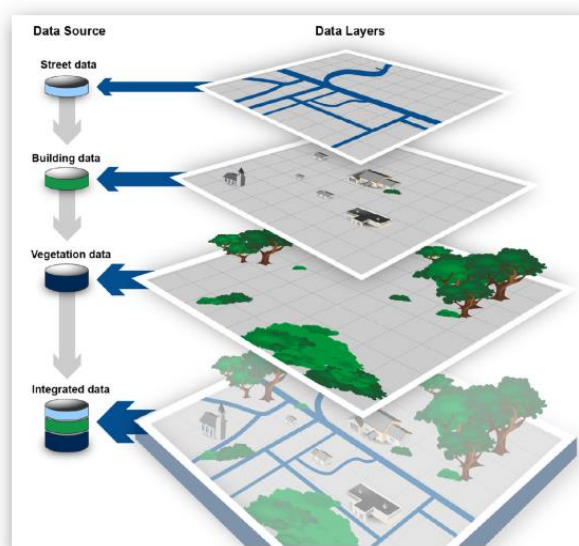


Figura 3: Representación visual de varias capas de datos en un SIG. Fuente: Zhou (2021).

1.3. Representación de datos en un SIG

La representación de datos espaciales (que representa las ubicaciones en una base de datos) puede realizarse en dos formatos básicos: i) Formato vectorial y ii) Formato raster. El formato vectorial se representa como puntos, líneas y áreas, y el formato raster se representa como una cuadrícula de celdas/píxeles. El formato vectorial se basa en vistas de objetos discretos de la realidad y el formato raster se basa en una red formada por celdas o cuadrículas (fotografías, imágenes, etc.), en la que cada cuadrícula (píxel) presenta una cualidad o propiedad espacial (color, altitud, entre otras). La principal diferencia con respecto a un archivo vectorial es

que en el archivo raster se almacenan píxeles mientras en el vectorial se almacenan coordenadas de los vértices de cada elemento geométrico.

En principio, cualquier situación del mundo real puede ser representada en forma digital en ambos formatos, raster y vectorial. Los SIG basados en ráster representan datos con píxeles en un mapa (**Figura 4**). Las ubicaciones se representan en una cuadrícula de celdas. En la figura, la superficie de un lago se asigna a un SIG ráster y da como resultado el grupo de celdas azul a la derecha. Las celdas no coinciden exactamente con los contornos del lago. La "cuadratura" de los bordes se denomina solapamiento (*aliasing* en inglés) y es causada por un muestreo imperfecto de curvas suaves. Tomar más muestras (es decir, usar cuadrículas más pequeñas con más bits por unidad de área) da como resultado menos alias y una mejor representación de la realidad física. Esto se denomina resolución más alta y es un término que se utiliza en todo el dominio de la tecnología espacial para medir el error. La precisión de los mapas SIG depende de cuántas muestras de datos se tomen por unidad de área. Los SIG basados en vectores representan las características físicas de la naturaleza como puntos, líneas o polígonos (**Figura 5**). Debe tenerse en cuenta que también hay solapamiento en los mapas vectoriales. En este caso, los límites curvilíneos de entidades como lagos o carreteras se miden con trozos de línea recta. Cuantas más vértices sean usadas, mejor será capturada la verdadera naturaleza de la función (Macarthur, 2002).

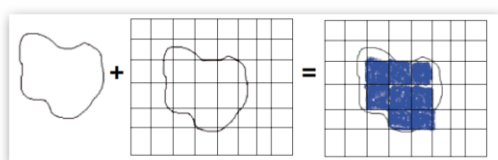


Figura 4: Representación utilizando el modelo Raster de un lago. Fuente: Macarthur (2002).



Figura 5: Representación utilizando el modelo Vectorial de un lago. Fuente: Macarthur (2002).

En los trabajos de Matellanes Ferreras (2017) y GEOINFORMATION (2020) establece una comparación entre los datos raster y vectorial de acuerdo a varios aspectos significativos, donde se puede apreciar las principales diferencias entre ambos. La **Tabla 1** muestra un resumen de esta comparación:

Tabla 1: Comparación entre la estructura de datos raster y la estructura de datos vectoriales. Fuentes: Matellanes Ferreras (2017) y GEOINFORMATION (2020).

Características	Datos Raster	Datos Vectoriales
<i>Introducción</i>	Un tipo de datos espaciales que se compone de una cuadrícula cuadrada de píxel.	Tipo de datos espaciales que se compone puntos y polígonos.
<i>Naturaleza de los datos</i>	Datos continuos	Datos discretos
<i>Representación</i>	Los datos se representan en celdas o píxeles.	Representa los datos mediante líneas, puntos y polígonos.
<i>Estructura de los datos</i>	Es una estructura de datos simple y de bajo costo.	Es una estructura de datos compleja.
<i>Identificador de ubicaciones</i>	El modelo de datos raster utiliza una serie de celdas o píxeles para representar ubicaciones en la tierra.	El modelo de datos vectoriales utiliza segmentos de punto y línea para identificar ubicaciones en la tierra.
<i>Operaciones de superposición</i>	En las operaciones de superposición de datos raster, las operaciones se implementan fácilmente.	En las operaciones de superposición de datos vectoriales son difíciles de implementar.
<i>Ejemplo</i>	Temperatura, lluvia y elevación.	Los límites administrativos y las entidades lineales como carretera y ríos.
<i>Capacidad de compactar información</i>	No es posible compactar la información	La información es compactada utilizando un menor volumen de datos.
<i>Precisión</i>	El nivel de precisión está dado por el tamaño de las celdas, pero siempre existe un margen de error en los cálculos de superficies y distancias.	Mayor precisión para el cálculo de superficies y distancias.
<i>Límites</i>	Límites basados en el propio tamaño de píxel y tienen ciertas dificultades para desarrollar análisis espaciales.	Límites más precisos al tratarse de líneas y puntos de fácil definición y distribución.
<i>Estructura</i>	Modelo sencillo y básico, pero poco compacto y tiene bastantes dificultades para representar información cuando se tienen archivos muy pesados	Modelo simple pero compacto. La representación de la información es sencilla y facilita el nivel de precisión.

<i>Representación tridimensional</i>	Pueden representar la realidad mediante el uso de matrices de tres dimensiones.	Tienen un carácter plano y no están capacitados para ser representados de la misma forma en el espacio.
<i>Uso comercial</i>	Difíciles de generar y conseguir, por lo que presentan un coste económico más elevado.	Son más utilizados y compartidos por su facilidad de generación.
<i>Asignación de atributos cualitativos o cuantitativos</i>	Admiten mejor la incorporación de datos desde el inicio de la creación del archivo cuando se trata de imágenes satelitales. Pero es difícil la edición de los datos posteriormente.	Facilidad de edición de los datos.
<i>Generación de reglas y condiciones topológicas</i>	Menor facilidad a la hora de desarrollar reglas y condiciones topológicas.	Genera problemas topología debido a posibles solapamientos entre elementos de la misma capa.

1.4. Los SIG y las Bases de Datos Espaciales (BDE)

Los datos de un SIG se almacenan en bases de datos espaciales. En las cuales pueden ser representados objetos del mundo real (carreteras, el uso del suelo, altitudes) agrupados en dos abstracciones: objetos discretos (una casa) y continuos (cantidad de lluvia caída, una elevación) (Boria *et al.*, 2020). Estas son una parte integral de los SIG al proveer capacidades para representar, almacenar y acceder a los datos, además de resolver los problemas de control de concurrencia, manejo de transacciones, copias de seguridad y recuperación ante fallas (Vitturini *et al.*, 2003).

Las BDE ofrecen capacidades para el manejo apropiado de datos espaciales, incluyendo modelos para la representación de objetos espaciales, métodos de recuperación rápidos y lenguajes de consulta específicos. Los datos espaciales están formados por objetos espaciales construidos a partir de puntos, líneas, regiones, volúmenes y hasta objetos de dimensiones superiores que pueden incluir restricciones temporales (Vitturini *et al.*, 2003).

Por su parte Hamid *et al.* (2020) afirma que el componente principal de un SIG es su base de datos de información. Esta base de datos es sofisticada al tomar información de diversas fuentes como mapas topográficos, mapas temáticos y mapas catastrales, en forma equivalente, imágenes detectadas a distancia en forma digital, entre otros. Cualquiera que sea la base de la información, es fundamental combinarlos en una proyección y grabación común.

Existen varias alternativas de BDE, que posibilitan el almacenamiento y tratamiento de la información georreferenciada. La **Tabla 2** muestra un resumen de algunos de estos softwares.

Tabla 2: Alternativas de bases de datos espaciales.

Nombre	Descripción	Desarrollador	Fecha de lanzamiento
<i>MySQL Spatial</i>	Extensión de MySQL, base de datos por defecto en plataformas de hosting y, por tanto, muy usada por desarrolladores web.	Oracle Corporation	1995
<i>Spatialite</i>	Extensión de SQLite, base de datos muy simple basada en ficheros.	Alessandro Furieri	2008
<i>PostGIS</i>	Extensión de PostgreSQL, potente base de datos multiplataforma que es totalmente compatible con los estándares ofrecidos por el Open Geospatial Consortium (OGC).	Refractions Research	1996
<i>H2GIS</i>	Extensión de H2, una base de datos ligera programada en Java, la cual funciona por medio	Thomas Mueller	2005

	de ficheros del mismo modo que SQLite.		
<i>GeoMesa</i>	Base de datos espacio-temporal basada en la nube construida sobre Apache Accumulo y Apache Hadoop (también es compatible con Apache HBase, Google Bigtable, Apache Cassandra y Apache Kafka). GeoMesa admite funciones simples de OGC completas y un complemento GeoServer.	LocationTech, 2015 CCRI	
<i>Oracle Spatial and Graph</i>	Componente gratuito de Oracle Database, proporciona características espaciales para administrar datos geográficos y de ubicación con tipos de datos nativos.	Oracle Corporation	2011
<i>MongoDB</i>	Sistema de Base de Datos NoSQL. En lugar de guardar los datos en tablas, tal y como se hace en las bases de datos relacionales, MongoDB utiliza estructuras de datos en formato BSON (una especificación similar a JSON).	MongoDB Inc.	2009
<i>MarkLogic</i>	Base de datos empresarial NoSQL, se considera un multi-modelo de base de datos NoSQL por su capacidad para	MarkLogic Inc.	2001

	almacenar, gestionar y buscar documentos JSON, XML y semánticas de datos.		
Neo4j	Base de datos orientada a grafos, implementado en Java. Motor de persistencia embebido, basado en disco, completamente transaccional, que almacena datos estructurados en grafos en lugar de en tablas.	Neo4j	2007

La elección de la base de datos espacial adecuada es extremadamente importante. Cada sistema tiene sus propias ventajas y desventajas que dependen del tipo de datos ingeridos y del resultado esperado del análisis. Tomar la decisión correcta se vuelve cada vez más difícil a medida que las BDE agregan módulos espaciales o extensiones para usar con datos geoespaciales (Deprizio, 2020).

Agarwal y Rajan (2016) realizaron una comparación entre PostgreSQL (PostGIS) y MongoDB donde esbozaron las ventajas y desventajas de utilizar un sistema de base de datos espaciales relacionales y no relacionales. Estos autores resaltaron la utilidad de PostgreSQL como una de las mejores alternativas de código abierto para el almacenamiento de datos espaciales. Asimismo, concluyeron que MongoDB se desempeña mejor a medida que aumenta el tamaño de los datos en las operaciones indexadas y no indexadas tanto para la intersección de líneas como para el problema de contención de puntos. Las bases de datos NoSQL pueden estar mejor definidas para sistemas de consulta simultáneos de múltiples usuarios, incluidos SIG Web y SIG Móvil. Las bases de datos no relacionales son más adecuadas para los sistemas de consulta multiusuario y tienen el potencial de ser implementadas en servidores con potencia computacional limitada.

Agarwal y Rajan (2016), por otra parte, afirmaron que todavía existen algunas limitaciones en el uso de bases de datos NoSQL sobre bases de datos SQL. No hay tantas funciones espaciales en NoSQL como en SQL. Las funciones geográficas implementadas actualmente solo admiten operaciones muy básicas. Las bases de datos relacionales siguen siendo muy superiores si el usuario necesita calcular la información geográfica a nivel de la base de datos.

En su artículo Deprizio (2020) presentó una comparación de las principales BDE más utilizadas actualmente. Se analizan MySQL, MongoDB, MarkLogic, Neo4j, y PostgreSQL (utilizando PostGIS). En la investigación se analiza el procesamiento de un conjunto de operaciones espaciales en cada uno de estas BDE. Para la inserción de datos se destaca PostgreSQL, mientras que para la realización de consultas MarkLogic resulta ser el más eficiente.

PostgreSQL y su extensión PostGIS resultan en ambos casos un denominador común entre las BDE analizadas. Entre las características que más destacan según Agarwal y Rajan (2016) se encuentran:

- Admite tipos de geometría para Puntos, Líneas, Polígonos, Multipuntos, Multilíneas, Multipolígonos y Colecciones de Geometría.
- Admite operadores espaciales para determinar medidas geoespaciales como área, distancia, longitud y perímetro.
- PostGIS también admite índices espaciales R-tree-over-GiST (árbol de búsqueda generalizada) para consultas espaciales de alta velocidad.
- La implementación de PostGIS se basa en geometrías e índices "ligeros" optimizados para reducir la huella de disco y memoria.

1.5. Herramientas de desarrollo SIG

Son varias las empresas y organizaciones que desarrollan nuevas herramientas SIG. Steiniger *et al.* (2010) las clasifican según su funcionalidad en siete tipos: (i) SIG de escritorio, (ii) Sistema de gestión de bases de datos espaciales (SGBDE), (iii) Servidor de mapas web, (iv) Servidor SIG, (v) Cliente web SIG, (vi) SIG móvil y (vii) Bibliotecas y extensiones (ver **Figura 6**).

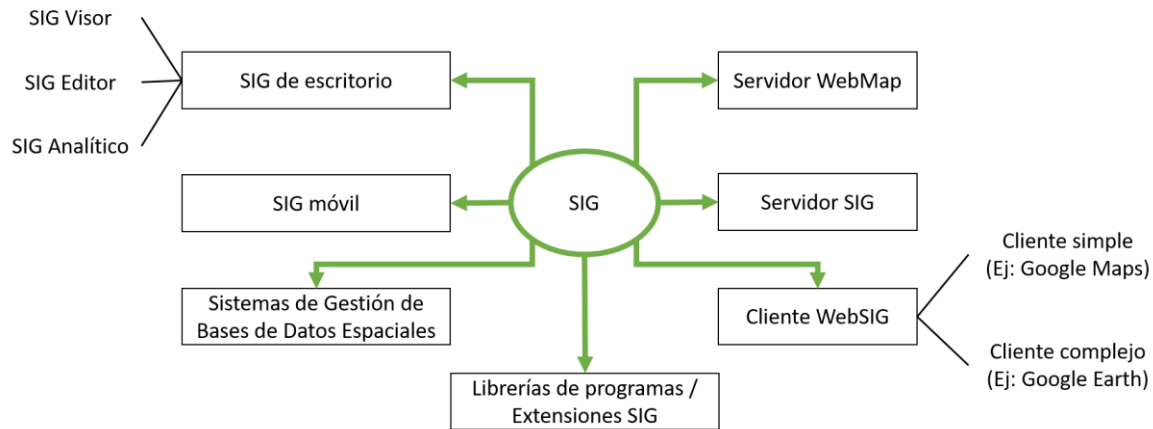


Figura 6: Diferentes tipos de software SIG. Fuente: Steiniger *et al.* (2010).

Steiniger y Hunter (2013) definen cada uno de estos tipos de SIG y sus funcionalidades. Estos explican que el proceso de selección, ya sea para empresas, investigación o docencia, debe basarse en un riguroso proceso de evaluación de software. En su trabajo los investigadores sostienen que entre los criterios que deben aplicarse durante la evaluación del proceso son, por ejemplo: funcionalidad del software, estabilidad del software, soporte de la plataforma, participación de mercado, credibilidad (marca) del fabricante del software, así como el tamaño de la red de soporte y distribución. Si bien estos criterios son comunes a la selección de software propietario, con respecto al software libre y de código abierto, también son importantes otros criterios. En particular, se debe considerar el proyecto que creó el software, ya que el estado del proyecto influirá en el soporte, la evolución (en términos de funcionalidad y dominio de uso) y la longevidad del software.

Varias investigaciones han realizado comparaciones entre diferentes SIGs. Ruiz (2016) analiza QGIS, gvSIG y ArcGIS en cuanto a herramientas que proporcionan para la creación de simbología vectorial y etiquetado, compatibilidad existente para la exportación e importación de estilos y simbologías, además se examinan las capacidades para la realización de series de mapas de forma automática. Se concluye la investigación afirmando que ArcGIS y QGIS presentan grandes similitudes para la elaboración de simbología vectorial, mientras que gvSIG tiene grandes limitaciones en este aspecto. La interfaz de QGIS para el diseño de los distintos símbolos cartográficos resulta más sencilla e intuitiva para el usuario,

presentando todas las herramientas en una misma ventana. Las capacidades de los SIG para la colocación de los rótulos sobre un mapa aún tiene mucho que mejorar, ya que una buena rotulación requiere de numerosas decisiones que los softwares en el momento de efectuarse la investigación no eran capaces de adoptar. ArcGIS presenta un tipo de rotulado avanzado que, junto con la utilidad de sus capas de anotaciones, facilita enormemente al usuario la tarea de colocación de las etiquetas, estando muy por encima de las capacidades de los otros dos programas.

Por otro lado, Olivo Bermeo (2019) comparó los SIG aplicados en estudios de casos ambientales, donde el factor clave de comparación fue la licencia del sistema (software libre o comerciales). Se analizan varios factores en ambos grupos como el manejo de capas, método de aplicación, la configuración general, la interfaz, el tratamiento de imágenes, entre otros. Se les asigna valores a juicio del autor. La **Tabla 3** muestra los resultados de este estudio.

Tabla 3: Resultado final de la comparación de SIG de licencias comerciales y libres.
Fuente: Olivo (2019).

	Software Libre			Software Comercial	
	Escala	QGIS	GvSIG	ArcGIS	Global Mapper
<i>Funcionalidad</i>	11	9	8.5	11	10
<i>Análisis Espacial</i>	4	3	1	4	4
<i>Capacidad Vectoral</i>	2	1.5	1.5	2	2
<i>Capacidad Raster</i>	4	2	2	4	4
<i>Interoperabilidad</i>	5	5	5	3.5	5
<i>Rendimiento</i>	4	3	3.5	3.5	4
<i>Generación de Mapas</i>	6	4.5	4.5	6	5

<i>Documentación y Soporte</i>	3	1.5	2	2.5	3
Total	29.5	28	36.5	37	

Olivo Bermeo (2019) concluye la investigación destacando que los softwares comerciales presentan mayor fiabilidad y rentabilidad basados en los parámetros analizados. Estos presentan una mayor interoperabilidad, generación de mapa, funcionalidad, capacidad y análisis en cuanto a las características de sus herramientas. A pesar de ello, los SIG deben ser valorados por su aplicabilidad y funcionalidades requeridas. En ocasiones el pago de un software SIG propietario sería innecesario, debido a que el uso de uno de software libre sería suficiente debido a funcionalidades solicitadas.

Utilizar un SIG u otro depende mucho de las necesidades del usuario, las características de lo que se quiere hacer y del presupuesto con el que cuente. Es necesario analizar si el presupuesto con el que se cuenta y el uso de un software de pago puede ser balanceado. Varios usuarios colocan a ArcGIS como el SIG más completo y el que cuenta con más funcionalidades, pero no obstante QGIS se ha convertido en los últimos años una alternativa libre y fiable que cumple con la mayoría de los requerimientos de la comunidad.

1.6. Fuentes para adicionar información espacial en las bases de datos PostgreSQL

Para el almacenamiento de información en PostgreSQL con PostGIS según OSGeo Project (2022) es importante tener en cuenta que una tabla en la base de datos se convierte en una capa espacial si al menos una de sus columnas posee datos espaciales como puntos, líneas o polígonos. Una vez incorporada al menos una columna con tipo de datos espacial en la tabla, esta se convierte en posible referencia espacialmente y por ende puede ser visualizada en QGIS.

Las bases de datos espaciales en PostgreSQL pueden nutrirse a partir de varias fuentes: utilizando las funcionalidades de un software SIG como QGIS, realizando una introducción manual de la información a través de un gestor para bases de

datos como PgAdmin o Navicat y utilizando las herramientas de consola de comandos incorporadas con PostGIS (OSGeo Project, 2022).

Los softwares SIG como QGIS, permiten la creación de tablas en una base de datos PostgreSQL. Esta debe tener soporte para datos espaciales a través de PostGIS y estar configurada su conexión en QGIS. Para la inserción de una capa espacial esta debe encontrarse insertada en el área de trabajo y posteriormente ser arrastrada hacia la base de datos que fue configurada en QGIS. De esta forma se creará una tabla en la base de datos cuyo nombre será exactamente el de la capa importada en QGIS (QGIS Project, 2022).

Otra forma de insertar información en una base de datos espacial puede ser mediante un sistema gestor de bases de datos como PgAdmin o Navicat. Para ello deberá crearse la estructura de la tabla de forma manual. Al menos una de las columnas deberá ser de tipo de datos espacial (punto, línea, polígono, geometría, geografía, entre otros) para que esta tabla pueda ser posteriormente visualizada en QGIS (PostGIS, 2022). Luego de que la tabla haya sido creada el procedimiento de introducción de datos debe realizarse de forma manual. A pesar de que PostGIS da soporte a PostgreSQL para el tratamiento de datos espaciales no es posible de forma visual marcar los elementos geográficos en un mapa por lo que su introducción se realizará en formato *String*¹ o *Bytecode*² (OSGeo Project, 2022). Esto dificulta el procedimiento de introducción de datos de forma manual.

Por otro lado, existe la posibilidad del uso de herramientas de líneas de comandos incorporadas por PostGIS, entre las que se destacan *shp2sql* para importar ficheros con formato SHP a una base de datos con PostgreSQL y *ogr2ogr* para importar ficheros espaciales con formato espacial diverso como KML u OSM. Estas herramientas solamente pueden ser ejecutadas en la PC donde se encuentra el servidor de bases de datos y la propia base de datos espacial. Para su ejecución se

¹ En cualquier lenguaje de programación, un Sting es una secuencia de caracteres usado para representar el texto

² Lenguaje intermedio más abstracto que el lenguaje máquina. Habitualmente, es tratado como un archivo binario que contiene un programa ejecutable similar a un módulo objeto, que es un archivo binario producido por el compilador cuyo contenido es el código objeto o código máquina.

debe tener un usuario con permisos de lectura y escritura con acceso a la base de datos y no se precisa de su contraseña. Estas herramientas son ejecutadas en la consola de comandos (QGIS Project, 2022).

Existen otras alternativas para la importación de información a una base de datos espacial, estas se tratan de sistemas realizados por terceros utilizando lenguajes de alto nivel como Python a través de GeoDjango³ y Leaflet⁴. Estas alternativas constituyen herramientas SIG en ocasiones completas cargadas de funcionalidades para importación de datos espaciales y su posterior análisis. Estas herramientas se basan en la resolución de problemáticas específicas (Django, 2022).

1.7. Aplicaciones de los SIG en la agricultura

Varios desafíos aumentan presión sobre las cadenas de suministro agrícola incluyendo la disminución de áreas cultivables, una demanda cada vez mayor de recursos naturales y problemas ambientales. Los sistemas agrícolas necesitan una gran transformación de las prácticas tradicionales a la agricultura de precisión o prácticas agrícolas inteligentes para superar estos desafíos. Los SIG constituyen una de esas tecnologías que impulsa los métodos actuales hacia la agricultura de precisión (Sharma *et al.*, 2018).

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas, la población mundial en julio de 2022 era de 7.9 mil millones de personas. Se calcula que en 2030 será de 8.5 y para 2100 de 11.2 mil millones de personas. Este crecimiento impone un desafío para la producción de alimentos, aunado al fomento del crecimiento socioeconómico, la adopción de sistemas productivos sostenibles y la adaptación al cambio climático.

Dado el impacto socioambiental de la agricultura, la Organización Mundial para la Agricultura y la Alimentación recomienda cinco principios para volverla sostenible: mejorar la eficiencia en el uso de recursos; realizar actividades directas para conservar, proteger y mejorar los recursos naturales; proteger y mejorar los medios

³ GeoDjango es una expansión del framework de desarrollo web Django, que añade funcionalidades específicas que permiten almacenar y manipular datos geográficos.

⁴ Biblioteca JavaScript de código abierto que se utiliza para crear aplicaciones de mapas web.

de vida rurales, la equidad y el bienestar social; reforzar la resiliencia de las personas, comunidades y ecosistemas; implementar políticas públicas responsables y eficaces que aseguren la sostenibilidad de la agricultura y la alimentación (Ocampo y Santa Catarina, 2018).

En la actualidad, la aplicación de SIG ha penetrado en todos los aspectos de la sociedad, involucrando todos los campos de información espacial relevantes, como la agricultura, la silvicultura, la conservación del agua, la tierra, los recursos y el medio ambiente. Las aplicaciones específicas incluyen la gestión de recursos naturales, el diseño agrícola y comercial, el análisis político y económico, la planificación del suelo urbano, la gestión del diseño de ingeniería, la ciencia, la educación, la cultura y el entrenamiento físico, la tecnología de defensa nacional, el transporte financiero, las instalaciones públicas y otros campos (Zhang y Cao, 2019).

Los SIG juegan un papel primordial en la agricultura actual. Su uso posibilita, entre otros la clasificación, mapeo y cartografía de cultivos con información georreferenciada. También la identificación de etapas fenológicas de las plantas, el monitoreo del riego y la predicción de rendimientos. Todo ello basado, fundamentalmente, en fuentes de información como las imágenes satelitales, la fotogrametría aérea y los datos de cosecha de las maquinarias agrícolas (Pérez-García *et al.*, 2019).

Según (Zhang y Cao, 2019) algunos de los usos específicos de los SIG en la agricultura son para llevar a cabo:

- Encuestas de zonificación agrícola
- Estimación de rendimiento de cultivos
- La agricultura de precisión
- Encuestas y contabilidad de cobertura vegetal
- Planes de toma de decisiones de gestión
- Delimitación del área de incendios forestales

Monitorear las tendencias del mercado, mejorar los rendimientos y predecir el clima se encuentran entre las muchas responsabilidades requeridas para reducir el riesgo de pérdida y aumentar la rentabilidad de los campos productivos. Utilizando el análisis geoespacial y modelado predictivo, los agricultores tienen la capacidad de visualizar sus tierras, cultivos y prácticas de gestión. Acceder a datos espaciales se ha convertido en una práctica agrícola esencial. Las agencias gubernamentales como el Departamento de Agricultura de EE. UU. (USDA) y la Unión Europea alojan sitios web que brindan información valiosa para ayudar a los agricultores a comprender mejor su tierra y tomar decisiones más informadas. Se puede acceder a estos datos en Internet para conseguir mejores prácticas comerciales agrícolas (Reza y Mohammad, 2015).

En los últimos años, el trabajo en teledetección agrícola se ha centrado más en la caracterización de las propiedades biofísicas de las plantas. La teledetección se ha utilizado durante mucho tiempo en el seguimiento y análisis de las actividades agrícolas. La teledetección de los doseles agrícolas ha proporcionado información valiosa sobre varios parámetros agronómicos. La ventaja de la teledetección es su capacidad para proporcionar información repetida y de grandes extensiones sin un muestreo destructivo del cultivo y puede utilizarse para proporcionar información valiosa para aplicaciones agrícolas. La teledetección ofrece una alternativa económica para la adquisición de datos en grandes áreas geográficas (Palanisamy *et al.*, 2019).

Budiharto *et al.* (2019) comentan sobre el uso de los vehículos aéreos no tripulados en la agricultura. Explican el gran auge que han tenido en los últimos años el uso de drones para la fumigación de los campos, control de plagas, así como la cartografía de los terrenos productivos. Los autores indican que las imágenes del terreno que pueden ser obtenidas a través de los satélites no siempre tienen la calidad necesaria para detectar ciertas anomalías en los cultivos o para detectar los cultivos propios; de ahí que los drones cumplan un papel fundamental en este sentido. Expresan que la información capturada por los drones es almacenada y georreferenciada para luego ser mostrada y analizada mediante en un SIG.

Por otro lado, Sambrekar y Rajpurohit (2019) promueven el uso de *Cloud Computing* (Computación en la Nube)⁵ aplicado en los procesos agrícolas. Indican que la información obtenida de los campos permite determinar cultivos marginales cultivados en terrenos fragmentados, cuantificación de su efecto en el rendimiento de los cultivos y detección del estrés de los cultivos debido a nutrientes y enfermedades. Indican que la aplicación de técnicas de computación en la nube posibilita el acceso de los usuarios al recurso de almacenamiento en cualquier momento y en cualquier lugar a través de Internet.

1.8. Conclusiones

Un SIG es una herramienta informática utilizada para analizar la información geográfica. Contiene una base de datos espaciales y atributos o información descriptiva de las características de un mapa que pueden ser utilizado para crear mapas preferidos. La ventaja fundamental de los SIG es la separación de la información de referencia espacial o geográfica y atributos o información descriptiva de las características del mapa para la entrada de datos y el desarrollo de bases de datos y su vinculación durante el análisis. La separación de los dos tipos de información facilita la introducción de la información espacial (mapa) en las computadoras en forma digitalizada y establecer la conectividad (topología) entre las diferentes características del mapa almacenadas (puntos, líneas y polígonos).

Existen software SIG en la actualidad con gran cantidad de funcionalidades implementadas que posibilitan el manejo adecuado de los datos geográficos. Es siempre necesario realizar un estudio preliminar al utilizar un SIG para determinar cuál de las implementaciones actuales se adapta mejor a las necesidades del problema en cuestión. Otro aspecto importante a tener en cuenta es si existe la necesidad y disponibilidad de utilizar software de pago o software libre.

Los sistemas de bases de datos dotan a los usuarios de una herramienta para almacenamiento y gestión de información. El uso de extensiones para la

⁵ Es el uso de una red de servidores remotos conectados a internet para almacenar, administrar y procesar datos, servidores, bases de datos, redes y software. En lugar de depender de un servicio físico instalado, se tiene acceso a una estructura donde el software y el hardware están virtualmente integrados.

manipulación de datos espaciales posibilita que la información pueda ser geolocalizada. Esto convierte a los sistemas de bases de datos en una fuente útil, simple y centralizada de información espacial para los softwares SIG, facilitando la gestión de capas espaciales.

El uso de las herramientas de consola de comandos para la importación de información espacial proveídas por PostGIS *shp2sql* y *ogr2ogr* son herramientas que permiten la importación de información espacial. Su ejecución de forma remota en el servidor donde se encuentra la base de datos espacial permitiría controlar el nombre y estructura con que esta información se almacenará en el servidor. Con esto se adiciona una estructura de control adicional para la adición de información a la base de datos. Teniendo en cuenta que los nombres de las capas que son importadas mediante estos programas provienen del nombre del fichero original es necesario durante el proceso de adición estos sean normalizados.

La aplicación de los softwares SIG en diferentes ramas han tenido en la actualidad un gran impacto. En la agricultura, han permitido aumentar el aprovechamiento de las áreas productivas, zonificar el impacto de las plagas, entre otras. Esto ha beneficiado grandemente a los productores, permitiéndoles aprovechar al máximo el espacio cultivable.

Capítulo II: Materiales y métodos

2.1. Introducción

En el presente capítulo se realiza una caracterización del área de estudio y se presentan las características de la información que fue utilizada durante la presente investigación. Luego se presentan los programas que serán utilizados para almacenar y mostrar la información obtenida, así como la procedencia de la misma.

2.2. Caracterización del área de estudio

La presente investigación fue realizada en la Unidad Docente Productiva “El Guayabal”. Esta se encuentra ubicada a las afueras del poblado de San José de las Lajas, perteneciente al municipio del mismo nombre, en la provincia Mayabeque, Cuba; específicamente en las coordenadas 22°59'57.49"N 82°10'09.42"W a 121 m por encima del nivel del mar y 5.3 km de la Universidad Agraria de La Habana “Fructuoso Rodríguez Pérez” (UNAH). A su vez la UNAH forma parte del complejo científico docente, del cual también forman parte el Centro Nacional de Salud Animal (CENSA), el Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA) y el Instituto de Ciencia Animal (ICA). El Complejo se destaca en la formación de los profesionales necesarios para el desarrollo agrícola de las provincias occidentales de Cuba, la participación en la solución de los problemas científico-técnicos en la superación y recalificación de los ingenieros y veterinarios, y en los planes nacionales de formación y superación de científicos e investigadores. En esta unidad docente se combina el trabajo de investigación a través de la producción agropecuaria. Estas producciones se destinan fundamentalmente a contribuir la alimentación de los estudiantes, profesores y trabajadores del Complejo Científico Docente.

La UDP tiene una extensión de 665.7 ha (equivalente a 49.6 caballerías), de la cual 72.2 ha están dedicadas a la agricultura. En ella predominan los suelos de tipo Ferralítico rojo con una erodabilidad baja, lo cual indica que el factor generador del fenómeno en esta localidad está asociado básicamente a la erosión por impacto, y al efímero escurrimiento producido durante las precipitaciones (Vega *et al.*, 2011).

De acuerdo a INSMET (2022), el clima de la zona, comprende 2 épocas o estaciones perfectamente definidas, una de abundantes lluvias, temperaturas, humedad relativa, evaporación y horas/sol más altas que comprende los meses de mayo a octubre y otra que se caracteriza por valores menores a los indicadores señalados que incluye los meses de noviembre hasta abril. En la época de lluvias, las precipitaciones alcanzan el 67.2% del total anual, con un promedio de precipitación anual de 87mm; sin embargo, hay una gran variación dentro de las épocas, que permite dividir los meses del año desde muy secos hasta muy húmedos. La temperatura media del aire alcanza sus valores mayores en los meses de julio y agosto (32°C) y los valores inferiores en enero y febrero (16 y 18°C). El promedio mensual de evaporación alcanza su valor máximo en mayo (230.6 mm) y su valor mínimo en diciembre (113.6 mm). En general los valores de máxima evaporación se corresponden con los de máxima insolación.

Para el desarrollo de la presente investigación los directivos de dicho centro facilitaron los siguientes documentos: Reporte Anual de la Producción Agrícola (2020 - 2021), Resumen Mensual de la Producción Agrícola en Proceso (2018 - 2021) y los Boletines Económicos (2011 - 2019).

Estos documentos permitieron determinar los productos que se cultivan en la UDP y las fechas de siembra y cosecha de los mismos. Para determinar las ubicaciones geográficas de las principales áreas productivas los directivos del centro guiaron un recorrido por las áreas. Se utilizó la herramienta informática para dispositivos móviles *Fields Area Measure Pro*⁶, la cual permitió con la ayuda del GPS y las imágenes satelitales mapear áreas de producción agropecuaria. Utilizando esta técnica se marcaron y etiquetaron las diferentes áreas de producción agrícola de la UDP El Guayabal, así como la localización y extensión de la máquina de riego (tipo Fregat).

Toda la información espacial obtenida se almacenó en ficheros de información geográfica (SHP, KML y OSM) con sus respectivas fechas de creación. Por otro

⁶ Herramienta para dispositivos móviles desarrollada por la empresa Farmis dedicada a la medición de terrenos utilizando la ayuda de dispositivos GPS e imágenes satelitales.

lado, el Departamento de Suelos de la Facultad de Agronomía de la UNAH facilitó los mapas de suelo del área. Estos mapas contienen los tipos de suelo presentes en el área, la concentración de fósforo, magnesio, potasio y pH de los suelos.

2.3. Procesamiento de los ficheros espaciales y datos climáticos

Para procesar los ficheros espaciales y almacenar su contenido en una base de datos espacial se utilizó las herramientas proporcionadas por PostGIS. Los programas *shp2sql* y *ogr2ogr*, incorporados en PostGIS, contienen las herramientas necesarias para la importación de ficheros de mapas a una base espacial PostgreSQL. Estos pueden ser ejecutados desde la terminal del sistema⁷. Mediante el uso de dichos comandos de la terminal los ficheros se procesan y se adicionan en la base de datos como tablas independientes, pudiéndose visualizar como capas en el SIG (PostGIS, 2022).

De acuerdo a los ficheros a procesar se utilizaría la siguiente sintaxis:

- SHP: Para el procesamiento de ficheros con este formato se necesita la ruta del fichero, el nombre de la base de datos y un nombre de usuario con acceso. Un ejemplo de este comando sería el siguiente:

```
shp2pgsql -d "/opt/file/guayabal.shp" | psql dbname dbuser
```

- KMZ y OSM: Estos dos tipos de ficheros espaciales tienen un procesamiento similar utilizando las herramientas de PostGIS. De igual forma que en el caso anterior solo es necesario la ruta hasta el fichero, el nombre de la base de datos y el nombre de un usuario con acceso. Un ejemplo sería el siguiente:

```
ogr2ogr -skipfailures -overwrite -progress -config PG_USE_COPY  
YES -f PGDump /vsistdout/ '/opt/file/GuayabalMap.kml' | psql  
dbname dbuser
```

⁷ Programa informático que provee una interfaz de usuario para acceder a los servicios del sistema operativo. Dependiendo del tipo de interfaz que empleen, las terminales pueden ser: De líneas texto, Gráficos, De lenguaje natural.

En ambos casos los comandos mencionados anteriormente deben ser ejecutados desde el servidor donde se encuentra la base de datos. Al procesarse un fichero se crea una tabla en la base de datos con el nombre del fichero.

Por otro lado, el estado del tiempo se obtuvo a partir de la información suministrada por el Instituto de Meteorología (INSMET). Las características de su sitio web y la carencia de servicios web hacen imposible ejecutar esta tarea de forma automatizada. La información fue obtenida de su sitio web institucional mediante la dirección:

<http://www.insmet.cu/asp/genesis.asp?TB0=PLANTILLAS&TB1=ESTACIONES&TB2=CUBA2&TB3=Mayabeque&TB4=/pronostico/est.csv&TB5=3>

La información fue formateada a la estructura JSON. Se seleccionaron como valores para almacenar la temperatura máxima y mínima, el porcentaje de humedad, velocidad del viento y el acumulado de lluvias en 24 horas. La **Figura 7** ilustra un ejemplo de la estructura de los datos del estado del tiempo que fueron introducidos a la base de datos.

```
{
  "temp_max" : "32.0 °C",
  "temp_min" : "24.0 °C",
  "humidity" : "82.5 %",
  "wind" : "3.6 km/h",
  "rain" : "0 mm"
}
```

Figura 7: Ejemplo del fichero que contiene los datos del estado del tiempo.

2.4. Otras Herramientas informáticas empleadas

Para el almacenamiento de información espacial se utilizó PostgreSQL. Para la utilización de objetos espaciales se instaló en PostgreSQL la extensión PostGIS. Para la visualización de la información espacial contenida en la base de datos se utilizó QGIS.

La base de datos se nutrió con información de varias fuentes:

- Información tomada del campo utilizando la aplicación para dispositivos móviles *Fields Area Measure Pro*. La información obtenida de esta aplicación puede ser exportado en varios formatos de fichero: SHP y KML.
- Utilizando la herramienta Google Maps para marcar los elementos geográficos. La información obtenida es exportada en formato KML.
- Utilizando herramientas de navegación que manipulan el formato *Open Street Map* (OSM) como Osmand o Maps.ME.
- Información proveniente de otros SIG (como por ejemplo ArcGIS, MapInfo. etc) con formato SHP, KML u OSM.
- Información climática facilitada por el instituto de meteorología (INSMET) en formato JSON.

Capítulo III: Resultados y discusión

3.1. Introducción

El presente capítulo contiene las características de la infraestructura desarrollada, así como del entorno donde fue desplegada. Se mencionan los programas y las versiones utilizadas, así como la URL de acceso al código fuente. Por otro lado, se ejemplifica el uso de dicha infraestructura con varios ficheros de información geográfica obtenidos del estudio en el centro. Se muestra la realización del proceso desde la entrada de datos y su captura mediante la aplicación móvil hasta su visualización en el software SIG. Además, también se muestra el tratamiento de la información climática que es introducida al software.

3.2. Infraestructura de software para el almacenamiento y visualización de información espacial

Para el almacenamiento de la información espacial disponible en una base de datos se seleccionó PostgreSQL con la extensión PostGIS, que dota a su vez a PostgreSQL de las herramientas necesarias para administrar información espacial. Las investigaciones de Agarwal y Rajan (2016) y Deprizio (2020) demuestran la fiabilidad y posibilidades que brinda PostgreSQL con su extensión PostGIS en el almacenamiento y procesamiento de información espacial. Este servidor está visible y su información es accesible para todos los usuarios.

Para la visualización de la información espacial se utilizó QGIS. Las investigaciones de Ruiz Fernández (2016) y Olivo Bermeo (2019) demuestran la utilidad de QGIS como software SIG de código abierto y su gran cantidad de funcionalidades disponibles.

Las distintas fuentes de información disponibles nutrieron la base de datos mencionada anteriormente por medio de una herramienta desarrollada utilizando Spring Boot. Se trata de un servidor de microservicios que permite a los usuarios enviar los ficheros y en dependencia del formato de estos se les da un

procesamiento diferente, garantizando que el mismo sea importado en la base de datos espacial y posteriormente accesible por los usuarios en el SIG anteriormente mencionado. Los trabajos de Jayawardana *et al.* (2018) y Dinh-Tuan *et al.* (2020) realizan una comparación entre diferentes marcos de microservicios y concluyen que Spring Boot es uno de los más útiles y estandarizados de los últimos años. Este marco es originario del lenguaje de programación Java.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra un diagrama que ilustra la infraestructura anteriormente mencionada. El software SIG (QGIS) se conecta al servidor de bases de datos PostgreSQL (que contará con la extensión PostGIS) para obtener las capas de información geográficas almacenadas en este.



Figura 8: Diagrama de la infraestructura propuesta.

La información fue adicionada al servidor mediante servicios web a través de un servidor desarrollado con el framework Spring Boot, que fue capaz de procesar los diferentes formatos de ficheros espaciales anteriormente mencionados (SHP, KML y OSM). Además, se incluye en la base de datos el estado del tiempo proveniente de un fichero en formato JSON.

Se adicionaron a los nombres de las capas una marca de fecha y hora que permitió converger en la misma base de datos varios objetos geográficos de la misma zona a lo largo del tiempo, añadiendo así una marca de tiempo a las capas. Se utilizó el siguiente formato de fecha y hora:

YYYY – MM – DD HH mm

YYYY: Año actual (4 cifras)

MM: Mes actual (2 cifras)

DD: Día actual (2 cifras)

HH: Hora actual en formato de 24 horas (2 cifras)

mm: Minutos actual (2 cifras)

3.3. Despliegue de la infraestructura de software en los servidores de la UNAH

Para comprobar el resultado del uso de la infraestructura desarrollada se realizó el despliegue de la misma en los servidores de la UNAH. El mismo fue realizado utilizando el servidor de virtualización para servidores físicos Proxmox⁸ versión 7.2, creándose un servidor virtual con el sistema operativo Ubuntu⁹ versión 22.04. En dicho servidor se instalaron las siguientes versiones de programas: PostgreSQL versión 14, Java JDK¹⁰ versión 18 y PostGIS versión 3.3. En el momento de la realización de la infraestructura se utilizaron las últimas versiones de todos los programas.

Posteriormente fue configurado el servidor de bases de datos PostgreSQL para aceptar peticiones desde cualquier dirección IP perteneciente al dominio *unah.edu.cu*, creada una nueva base de datos llamada *geoServer* y un usuario llamado *geo* (usuario utilizado para las conexiones clientes desde QGIS), que tiene sólo permisos de lectura en dicha base de datos. Se creó un segundo usuario llamado *geoAdmin* (usuario utilizado para la conexión del servidor de microservicios desarrollado utilizando Spring Boot con la base de datos) que tiene privilegios de lectura-escritura.

⁸ Entorno de virtualización de servidores de código abierto. Es una distribución de GNU/Linux basada en Debian, con una versión modificada del Kernel Ubuntu LTS. Permite el despliegue y la gestión de máquinas virtuales y contenedores.

⁹ Distribución Linux basada en Debian GNU/Linux, que incluye principalmente software libre y de código abierto. Puede utilizarse en ordenadores y servidores.

¹⁰ Java Development Kit es un software que provee herramientas de desarrollo para la creación de programas desarrolladas en el lenguaje de programación Java.

El código fuente del servidor web desarrollado en Spring Boot (en lo adelante *geoDataImporter*) se encuentra almacenado en el repositorio de códigos fuente institucional de la UNAH (GitLab¹¹). Este código fuente es accesible mediante la URL <https://git.unah.edu.cu/gabrielpg/geodataimporter.git>. El acceso a este código fuente es libre para todos los usuarios de la RED-UNAH, sin embargo, su mantenimiento solamente es permitido a personal autorizado.

Se descargó el código fuente ubicado en la rama *master* del proyecto y se realizó la configuración de los puertos del servicio web, ruta de almacenamiento de ficheros temporal y acceso a la base de datos en el fichero *application.properties* (fichero donde se encuentra la configuración del servidor de microservicios) y se inició el servicio.

3.4. Uso de la infraestructura diseñada

Para ejemplificar el uso de la infraestructura desarrollada se utilizaron ficheros espaciales creados a partir de la información histórica brindada por la UDP y de la información tomada con herramienta móvil *Fields Area Measure Pro* a partir del recorrido por las instalaciones. Dichos ficheros fueron procesados utilizando la infraestructura propuesta en el epígrafe **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

3.4.1. Proceso de obtención de información geográfica de la UDP “El Guayabal”

Para la obtención de ficheros espaciales con información de las áreas de producción agropecuaria de la UDP se utilizó la herramienta *Fields Area Measure Pro* con uso del GPS (**Figura 9**), donde se localizaron las diferentes áreas de producción agrícola del centro. Este mapeo permitió determinar las delimitaciones y dimensiones de las áreas de producción agrícola presentes en el centro. Es importante destacar que las imágenes satelitales utilizadas como referencia no permiten en ocasiones determinar visualmente los límites de los campos de cultivo,

¹¹ Git es un software de control de versiones diseñado por Linus Torvalds, pensando en la eficiencia, la confiabilidad y compatibilidad del mantenimiento de versiones de aplicaciones cuando estas tienen un gran número de archivos de código fuente.

teniendo en cuenta que no necesariamente estos deben estar actualizados. Por tal motivo existen delimitaciones de algunos terrenos que no coinciden visualmente con las imágenes satelitales.



Figura 9: Mapeo de las áreas productivas de la UDP Guayabal utilizando la herramienta *Fields Area Measure Pro*.

Por otro lado, se conformaron ficheros geográficos en formato SHP que contienen la distribución de los cultivos en el campo a partir de los datos históricos proporcionados por el centro. Se conformó además un fichero KML que contiene el área abarcada por la máquina de riego y brazo mecánico. El departamento de Suelos de la Facultad de Agronomía de la UNAH proporcionó además una serie de capas geográficas con información del suelo.

Para la información del clima, se confeccionaron una serie de ficheros en formato JSON que contienen la información del clima del periodo comprendido entre el mes de agosto y septiembre del 2022.

3.4.2. Proceso de importación de los datos geográficos utilizando *goeDataImporter*

Para el proceso de importar los ficheros con información geográfica a la base de datos se utilizó la herramienta diseñada *goeDataImporter*. Al tratarse de un servicio web (rest-api) y carecer de una interfaz visual, se utilizó la herramienta Postman¹² para comprobar el estado de los servicios. Se inició la prueba con el fichero obtenido del mapeo de las áreas de producción agrícola. La **Figura 10**, muestra la configuración realizada en Postman para la ejecución del api-rest que permite la subida de ficheros con formato SHP al sistema (en este caso `/uploadFile/shapeFile/`).

Como se puede apreciar en la **Figura 10** es necesario especificar los cuatro ficheros que componen el formato SHP (DBF, PRJ, SHP y SHX). Si alguno de estos ficheros no fuese incluido en el momento de la petición esta devolverá un error.

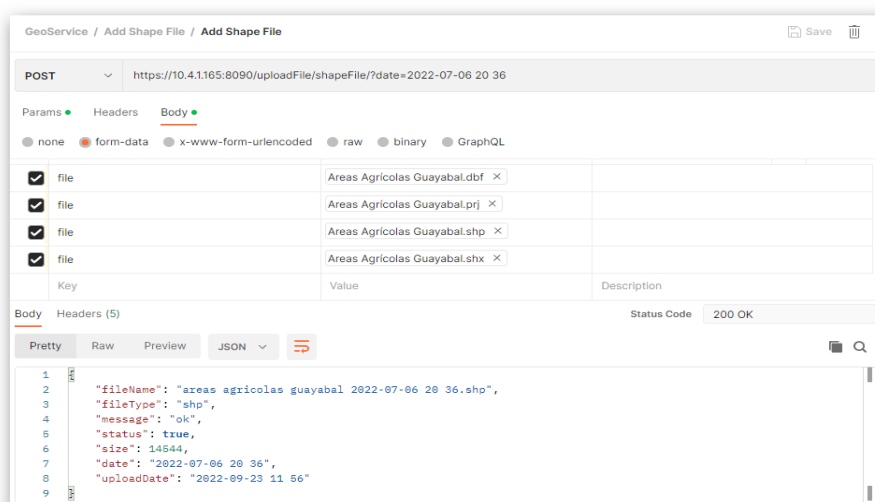


Figura 10: Ejemplo de subida de un fichero SHP utilizando el servicio api-rest con Postman.

Se envió un segundo fichero, en este caso, uno con formato KML que contiene los datos de la máquina de riego de la UDP. Para ello, se utilizó nuevamente la herramienta Postman. La **Figura 11** muestra el resultado de la ejecución del servicio

¹² Plataforma API para construir y usar API. Contiene herramientas para que los desarrolladores diseñen, creen, prueben e iteren sus API.

web (/uploadFile/commonFile). Nótese que el fichero a enviarse tiene formato KML; sin embargo, pueden ser enviados también ficheros con formato OSM. En dicho caso, el procedimiento sería el mismo.

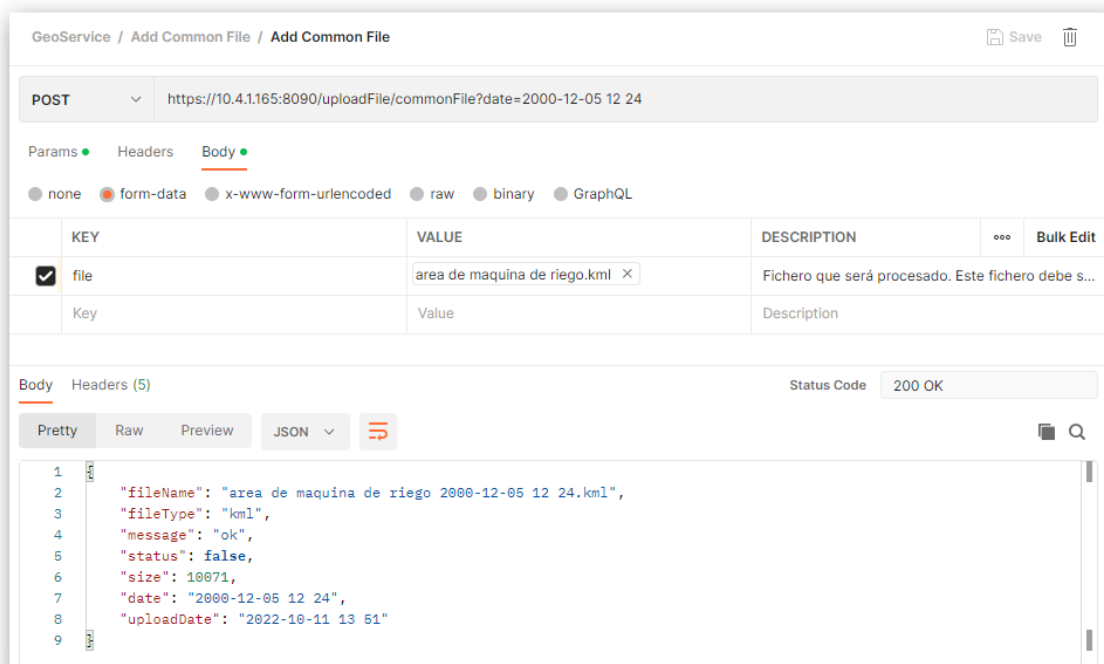


Figura 11: Ejemplo de subida de un fichero KML utilizando el servicio api-rest con Postman.

Para ejemplificar el envío de información climática al sistema, como se muestra en la **Figura 12** se realizó el registro de los datos climáticos del día 10 de septiembre del 2022 (tomados del sitio oficial del INSMET) a través del servicio web correspondiente (en este caso /weather/insert/). Como se puede apreciar en la imagen se especifica la latitud y longitud del punto al cual se asocia la información geográfica. Este elemento no es requerido, y en caso de no ser indicado por el usuario, el sistema por defecto toma las coordenadas de la UDP para registrar la entrada. Teniendo en cuenta que la variabilidad del clima en una zona de pequeño tamaño es mínima se establece la creación de un punto para referenciar dicha información. Este posibilita que la información climática sea mostrada en QGIS por medio de un objeto de tipo punto.

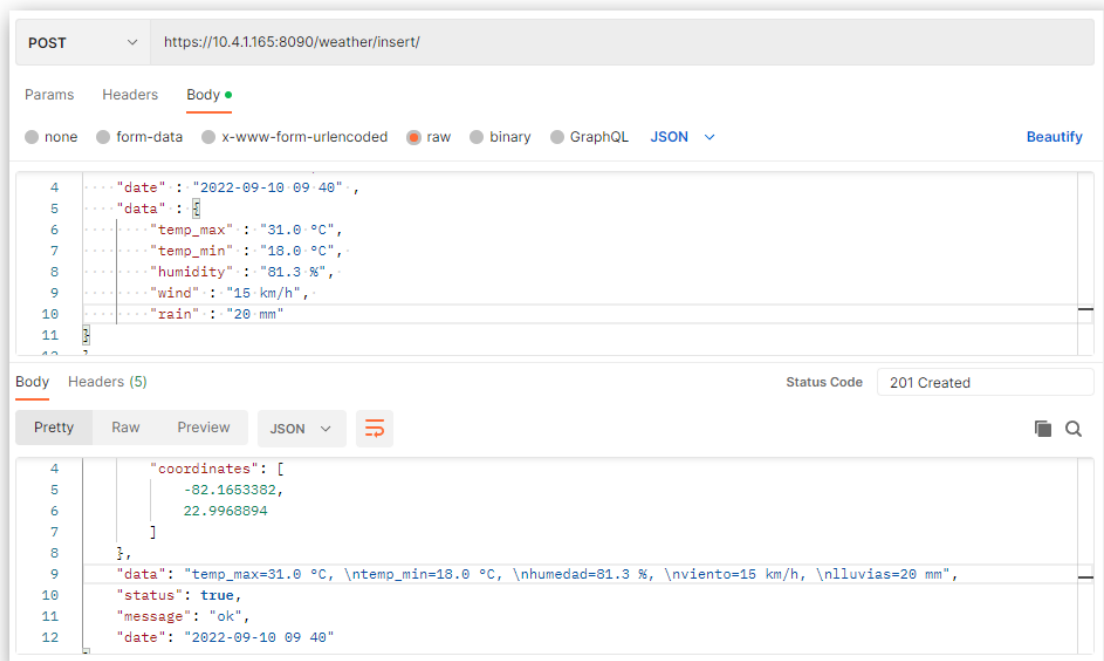


Figura 12: Ejemplo del envío de la información climática utilizando el servicio api-rest con Postman.

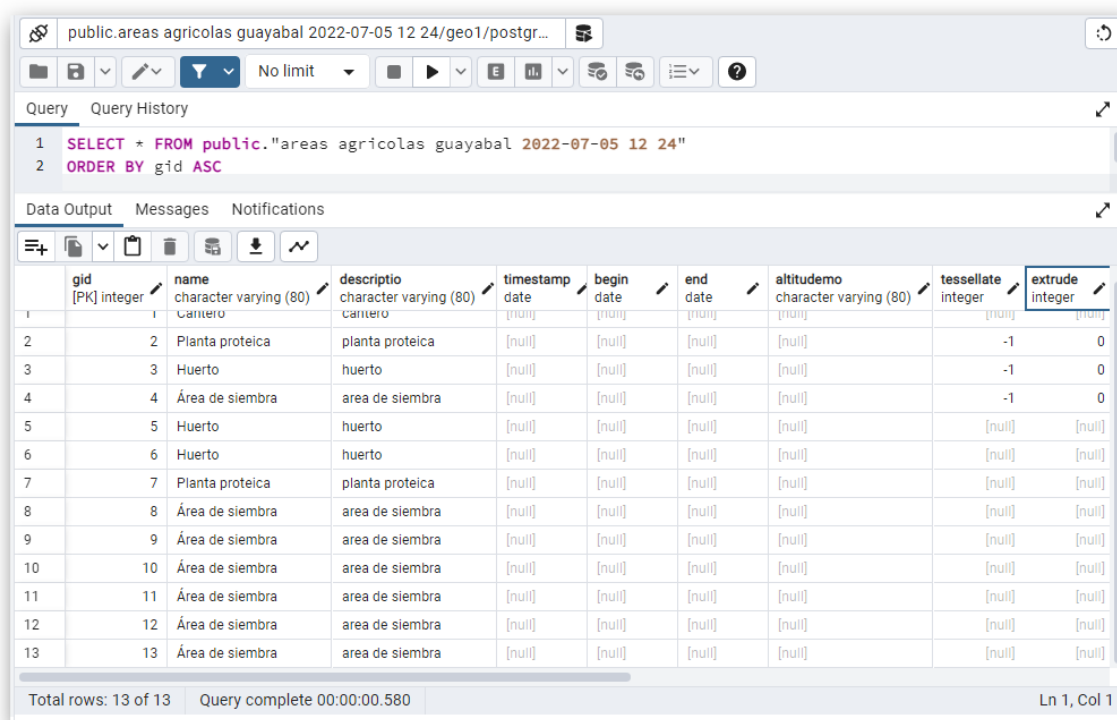
Otro aspecto a destacar es el papel que desempeña la fecha en dichos servicios web. En el caso de los servicios web de importación de ficheros geográficos es posible incluir en la dirección la fecha en la que ha sido creada la capa. En el caso de los datos climáticos esta información deberá ser insertada en el cuerpo de la petición. Esto posibilita insertar información antigua y establecer una línea de tiempo para su posterior análisis.

3.4.3. Visualización de la información importada en la base de datos

Una vez importadas las capas en la base de datos utilizando *geoDataImporter* se realizó una comprobación para verificar que se hayan importado correctamente en el servidor de bases de datos PostgreSQL, en este caso se utilizó la herramienta pgAdmin4¹³. La **Figura 13** muestra los datos que se encontraban en el fichero SHP importado anteriormente. En este caso ha sido importado el nombre del elemento,

¹³ Entorno de escritorio visual libre y de código abierto que permite conectarse a bases de datos PostgreSQL. Facilita la gestión y administración de bases de datos ya sea mediante instrucciones SQL o con ayuda de un entorno gráfico. Permite acceder a todas las funcionalidades de la base de datos; consulta, manipulación y gestión de datos.

una descripción, los datos geográficos del polígono, entre otros elementos provenientes del fichero SHP.



The screenshot shows the pgAdmin interface with a SQL query executed. The query is: `SELECT * FROM public."areas agricolas guayabal 2022-07-05 12 24" ORDER BY gid ASC`. The results are displayed in a table with 13 rows and 10 columns.

	gid [PK] integer	name character varying (80)	descriptio character varying (80)	timestamp date	begin date	end date	altitudemo character varying (80)	tessellate integer	extrude integer
1	1	Cantero	cantero	[null]	[null]	[null]	[null]		
2	2	Planta proteica	planta proteica	[null]	[null]	[null]	[null]	-1	0
3	3	Huerto	huerto	[null]	[null]	[null]	[null]	-1	0
4	4	Área de siembra	area de siembra	[null]	[null]	[null]	[null]	-1	0
5	5	Huerto	huerto	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
6	6	Huerto	huerto	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
7	7	Planta proteica	planta proteica	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
8	8	Área de siembra	area de siembra	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
9	9	Área de siembra	area de siembra	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
10	10	Área de siembra	area de siembra	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
11	11	Área de siembra	area de siembra	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
12	12	Área de siembra	area de siembra	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
13	13	Área de siembra	area de siembra	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]

Total rows: 13 of 13 Query complete 00:00:00.580 Ln 1, Col 1

Figura 13: Visualización de la tabla “areas agricolas guayabal 2022-07-05 12 24” que fue importada desde el fichero SHP en pgAdmin.

Por su parte los datos climáticos importados fueron almacenados en la tabla “*weather*”, la cual contendrá el histórico de los datos de clima. La **Figura 14** muestra la información de los datos del clima de agosto – septiembre del 2022 insertados en la base de datos.

id [PK] bigint	data character varying (255)	date timestamp without time zone	location geography
1	temp_max=32 °C, temp_min=21 °C, humedad=75,6 %, viento=11 km/h, lluvias=4...	2022-08-11 0...	0101000020E610...
2	temp_max=32 °C, temp_min=17 °C, humedad=80,1 %, viento=23 km/h, lluvias=3...	2022-08-31 0...	0101000020E610...
3	temp_max=31 °C, temp_min=22 °C, humedad=80,1 %, viento=33 km/h, lluvias=2...	2022-09-17 0...	0101000020E610...
4	temp_max=34 °C, temp_min=21 °C, humedad=80,1 %, viento=00 km/h, lluvias=4...	2022-09-19 0...	0101000020E610...
5	temp_max=29 °C, temp_min=24 °C, humedad=73,7 %, viento=30 km/h, lluvias=2...	2022-09-13 0...	0101000020E610...
6	temp_max=30 °C, temp_min=17 °C, humedad=80,1 %, viento=22 km/h, lluvias=3...	2022-09-21 0...	0101000020E610...
7	temp_max=32 °C, temp_min=24 °C, humedad=73,7 %, viento=10 km/h, lluvias=4...	2022-09-01 0...	0101000020E610...
8	temp_max=33 °C, temp_min=25 °C, humedad=79,9 %, viento=10 km/h, lluvias=3...	2022-08-30 0...	0101000020E610...
9	temp_max=34 °C, temp_min=19 °C, humedad=79,9 %, viento=30 km/h, lluvias=4...	2022-09-12 0...	0101000020E610...
10	temp_max=32 °C, temp_min=23 °C, humedad=75,3 %, viento=10 km/h, lluvias=2...	2022-08-27 0...	0101000020E610...
11	temp_max=33 °C, temp_min=24 °C, humedad=73,7 %, viento=13 km/h, lluvias=0...	2022-08-18 0...	0101000020E610...
12	temp_max=32 °C, temp_min=21 °C, humedad=79,9 %, viento=11 km/h, lluvias=2...	2022-08-03 0...	0101000020E610...
13	temp_max=33 °C, temp_min=21 °C, humedad=79,9 %, viento=23 km/h, lluvias=3...	2022-09-02 0...	0101000020E610...
14	temp_max=32 °C, temp_min=18 °C, humedad=74,2 %, viento=30 km/h, lluvias=1...	2022-09-24 0...	0101000020E610...

Total rows: 61 of 61 Query complete 00:00:00.244

Figura 14: Visualización de la tabla “*weather*” que contiene los datos del clima de agosto-septiembre de 2022..

Como se puede apreciar, el fichero JSON con los datos del clima se ha almacenado en la columna “*data*”, el resto de los datos, como la fecha y la posición del punto geográfico han sido almacenados en sus respectivas columnas.

3.4.4. Visualización de la información de la base de datos en QGIS

Una vez incorporados los datos en la base de datos se procedió a su visualización en QGIS. Inicialmente fue necesario configurar PostGIS como el servidor de bases de datos espaciales y así tener acceso a los datos anteriormente adicionados.

La **Figura 15** muestra un ejemplo de varias capas importadas utilizando la infraestructura desarrollada. En este ejemplo fueron incluidas dos capas: áreas agrícolas guayabal y área de la máquina de riego. Se ha incorporado además una capa compuesta por las imágenes satelitales de la zona provenientes de los servicios de Google Maps.

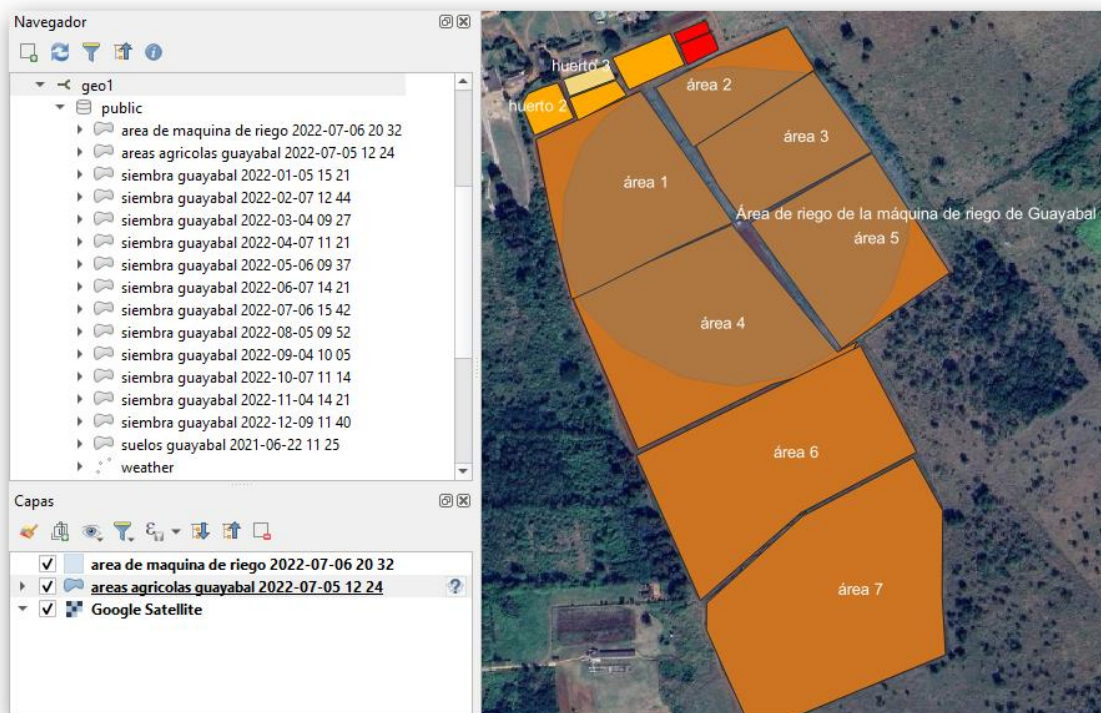


Figura 15: Ejemplo de visualización en QGIS las capas espaciales almacenadas en PostgreSQL.

Una vez importados los datos en QGIS se pueden alternar entre las capas y realizar consultas especializadas que le permitan obtener información específica. En este caso se puede visualizar de forma espacial además el espacio que abarca la máquina de riego en comparación con las áreas productivas de la UDP. Se puede apreciar como quedan fuera dos de sus áreas y otras cuatro no son abarcadas en su totalidad debido a la forma circular del área de riego y poligonal de las áreas de siembra.

Por otro lado, se importó la capa que contiene los tipos de suelo que fue adicionada anteriormente a la base de datos y de esta forma pudo tenerse una idea visual del tipo de suelo en el que se encuentran las áreas de producción agrícola de la UDP. La **Figura 16** ilustra el predominio de suelo Ferralítico Rojo Típico sobre gran parte de las áreas de producción agrícola, sin embargo, en el caso de las áreas de siembra “área 6” y “área 7” se puede apreciar cómo una parte de las mismas es cruzada por una franja de suelo Ferralítico Rojo Hidratado.



Figura 16: Ejemplo de visualización en QGIS de las capas de tipos de suelo y áreas de producción agrícola presentes en la UDP.

Es posible además incluir la capa del estado del tiempo y visualizarlo utilizando QGIS cargando los datos de la tabla “weather” sin la necesidad de utilizar un SGBD. Debido a que esta tabla puede contener una gran cantidad de entradas debe realizarse un filtro utilizando el constructor de consultas de la capa y realizar un filtro por fecha. La **Figura 17** muestra un ejemplo donde se ha seleccionado la capa que contiene el estado del tiempo (medido a lo largo de dos meses) y la capa de las zonas de siembra de la UDP. Los datos del tiempo se han filtrado por su fecha de adición, seleccionándose la entrada del 10 de septiembre del 2022 a las 07:32 AM (2022-09-10 07:32:15).

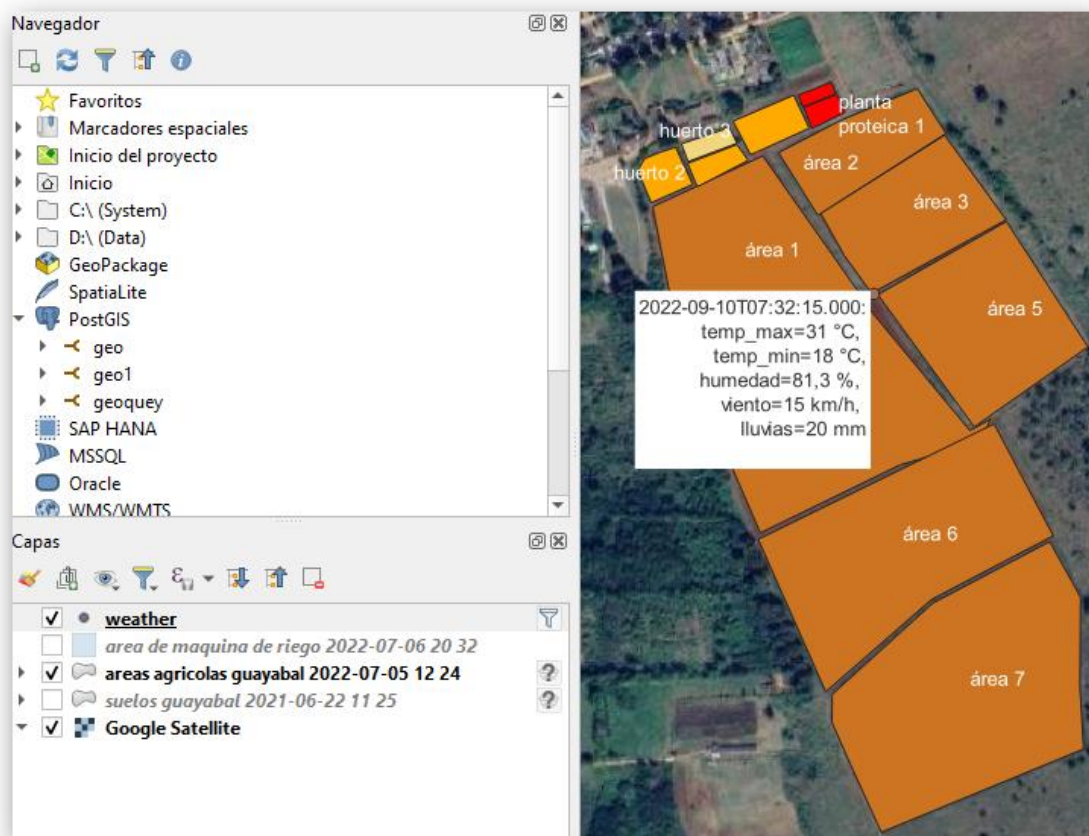


Figura 17: Visualización del estado del tiempo de una fecha específica en QGIS.

Conclusiones

1. El uso del software SIG QGIS resulta adecuado para el trabajo con información espacial en la UDP “El Guayabal” debido a su simplicidad, amplia aplicación internacional, extensa gama de funcionalidades disponibles y coste nulo.
2. PostgreSQL, con su extensión PostGIS garantizan un eficaz almacenamiento y recuperación de la información espacial disponible en la UDP “El Guayabal”. QGIS cuenta con soporte para establecer conexiones con PostgreSQL, con lo cual los usuarios pueden acceder a la información espacial almacenada en éste.
3. Se identificaron como fuentes de información geográfica para la UDP “El Guayabal” los ficheros con formato SHP, KML y OSM procedentes de las herramientas *Fields Area Measure Pro*, Google Earth y Open Street Map, y la información de suelo disponible. La información meteorológica se introdujo con formato JSON.
4. El uso de la aplicación *Fields Area Measure Pro* resulta conveniente para desarrollar nuevas capas de información geográfica de áreas de producción agrícola de la UDP “El Guayabal”.
5. El despliegue de la infraestructura conformada por el software SIG QGIS, el SGBD PostgreSQL (con su extensión PostGIS para la manipulación de información espacial) y el software desarrollado *geoDataImporter* permite crear un entorno colaborativo de intercambio de información espacial y facilita la actualización y visualización de la información espacial de las áreas de producción agrícola a los directivos de la UDP “El Guayabal” y a los estudiantes y profesores que desarrollan investigaciones en este centro.

Recomendaciones

1. La creación de una interfaz visual amigable (web o de escritorio) para los usuarios finales que les permita la introducción de información espacial a través de GeoDataImporter de una forma amena e intuitiva.
2. Trazar una estrategia con el instituto de meteorología para la conformación de un mecanismo de obtención de la información del clima de la zona de guayabal de forma automatizada.
3. La creación de una tabla en la base de datos que contenga la información de acceso y modificaciones a los datos. De esta forma se puede llevar un control del acceso y modificación de los datos.

Bibliografía

Agarwal, S. y Rajan, K. S. (2016) "Performance analysis of MongoDB versus PostGIS/PostgreSQL databases for line intersection and point containment spatial queries", *Spatial Information Research*. Springer, 24(6), pp. 671-677.

Ayad, A., Khalifa, A. y Fawy, M. (2021) "A Model - Based Approach for Leak Detection in Water Distribution Networks Based on Optimisation and GIS Applications", *Civil and Environmental Engineering*, 17(1), pp. 277-285. doi:10.2478/cee-2021-0029.

Benítez-Puig, L. y Viñas-Quintero, Y. (2018) "Contribución al manejo sostenible del cultivo de la caña de azúcar en Cuba", *Revista Ingeniería Agrícola*, 8(2), pp. 62-67.

Bill, R., Nash, E. y Grenzdörffer, G. (2012) "GIS in Agriculture", en Kresse, W. y Danko, D. M. (eds.) *Springer Handbook of Geographic Information*. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer Handbooks), pp. 461-476. doi:10.1007/978-3-540-72680-7_24.

Boria, E. S., Badhrudeen, M., Fonteix, G., Derrible, S. y Siciliano, M. (2020) "A Protocol to Convert Infrastructure Data from Computer-Aided Design (CAD) to Geographic Information Systems (GIS)".

Brisaboa, N. R., Lema, J. A. C., Fariña, A., Luaces, M. R. y Viqueira, J. R. (2000) "Sistemas de Información Geográfica: Revisión de su Estado Actual", *Laboratorio de Bases de Datos, Universidad de Coruña*, pp. 77-94.

Budiharto, W., Chowanda, A., Gunawan, A. A. S., Irwansyah, E. y Suroso, J. S. (2019) "A Review and Progress of Research on Autonomous Drone in Agriculture, Delivering Items and Geographical Information Systems (GIS)", en *2019 2nd World Symposium on Communication Engineering (WSCE)*. 2019 2nd World Symposium on Communication Engineering (WSCE), Nagoya, Japan: IEEE, pp. 205-209. doi:10.1109/WSCE49000.2019.9041004.

Chinea-Horta, A., Rodríguez-Izquierdo, L. y Muñoz-Medina, I. (2022) "Distribución espacial de sistemas de riego mediante tecnologías de la información geográfica en áreas cañeras", *Revista Ingeniería Agrícola*, 12(2).

Deprizio, J. (2020) *Comparative Analysis of Database Spatial Technologies (CADST)*. Thesis. George Mason University. Disponible en: <http://mars.gmu.edu/handle/1920/11656> (Accedido: 16 de enero de 2021).

Dinh-Tuan, H., Mora-Martinez, M., Beierle, F. y Garzon, S. R. (2020) "Development Frameworks for Microservice-based Applications: Evaluation and Comparison", en *Proceedings of the 2020 European Symposium on Software Engineering. ESSE 2020: 2020 European Symposium on Software Engineering*, Rome Italy: ACM, pp. 12-20. doi:10.1145/3393822.3432339.

Django, S. F. (2022) *Django documentation, Django documentation*. Disponible en: <https://docs.djangoproject.com/en/4.1/ref/contrib/gis/> (Accedido: 24 de octubre de 2022).

Dunaieva, I., Mirschel, W., Popovych, V., Pashtetsky, V., Golovastova, E., Veчерkov, V., Melnichuk, A., Terleev, V., Nikonorov, A., Ginevsky, R., Lazarev, V. y Topaj, A. (2019) "GIS Services for Agriculture Monitoring and Forecasting: Development Concept", en Murgul, V. y Pasetti, M. (eds.) *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018*. Cham: Springer International Publishing (Advances in Intelligent Systems and Computing), pp. 236-246. doi:10.1007/978-3-030-19868-8_24.

Esquivel, M., Hernández, B., Fernández, F., Marreno, S., Ponce, E., Quintana, L., González, L., Mayet, A., Muñoz, R. y García, J. (2008) "Agricultura de precisión en la caña de azúcar", *Mapping. eGeoMapping*, (127), pp. 42-49.

GEOINFORMATION (2020) "Advantages and Disadvantages of Raster and Vector data model", *GEOINFORMATION*, 15 diciembre. Disponible en: <https://www.geoinformations.com/2020/08/advantages-and-disadvantages-of-raster.html> (Accedido: 15 de diciembre de 2020).

Goodchild, M. F. y Kemp, K. K. (1990) *NCGIA core curriculum: introduction to GIS*. National Center for Geographic Information and Analysis, University of Southern California.

Hamid, A. M., Sameer, M. K. y Mageed, N. N. (2020) "Geo-database production of digital land use map using remote sensing and GIS techniques", en *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics, p. 020024. doi:10.1063/5.0000099.

INSMET (2022) *Resumen Sinóptico Mensual, Instituto de Meteorología*. Disponible en: <http://www.insmet.cu/asp/genesis.asp?TB0=PLANTILLAS&TB1=MES&TB2=/Mes/SEPTIEMBRE2021.HTM&TB3=2021> (Accedido: 30 de octubre de 2022).

Jayawardana, Y., Fernando, R., Jayawardana, G., Weerasooriya, D. y Perera, I. (2018) "A Full Stack Microservices Framework with Business Modelling", en *2018 18th International Conference on Advances in ICT for Emerging Regions (ICTer)*. *2018 18th International Conference on Advances in ICT for Emerging Regions (ICTer)*, pp. 78-85. doi:10.1109/ICTER.2018.8615473.

Lao Ramos, B. y Peláez Hernández, D. (2018) "La teledetección y los Sistemas de Información Geográfica para el manejo de las tierras", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 27(1), pp. 54-65.

Lau Quan, A., Garea Llano, E. y Ruiz Pérez, M. E. (2005) "Estimación de la salinidad de los suelos utilizando una imagen espectrozonal y el sistema de información

geográfica TELEMAT", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez, 14(1), pp. 47-54.

Macarthur, R. (2002) "Chapter 6 - GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS AND THEIR USE FOR ENVIRONMENTAL MONITORING", en Artiola, J. F., Pepper, I. L., y Brusseau, M. L. (eds.) *Environmental Monitoring and Characterization*. Burlington: Academic Press, pp. 85-100. doi:10.1016/B978-012064477-3/50008-4.

Matellanes Ferreras, R. (2017) "Modelo vectorial y raster: ventajas y desventajas - Blog Geoinnova", *Territorio Geoinnova - SIG y Medio Ambiente*, 23 mayo. Disponible en: <https://geoinnova.org/blog-territorio/modelo-vectorial-y-modelo-raster/> (Accedido: 16 de febrero de 2020).

Nowak, M. M., Dziób, K., Ludwisiak, Ł. y Chmiel, J. (2020) "Mobile GIS applications for environmental field surveys: A state of the art", *Global Ecology and Conservation*, 23, p. e01089. doi:10.1016/j.gecco.2020.e01089.

Núñez, F. y Manuel, H. (2006) "SIG-ESAC: Sistema de Información Geográfica para la gestión de la estadística de salud de Cuba", *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*. 1999, Editorial Ciencias Médicas, 44(3), pp. 0-0.

Ocampo, M. y Santa Catarina, C. (2018) "Agricultura de Precisión", en *Oficina de Información Científica y Tecnológica para el congreso de la Union (INCyTU)*, p. 15.

Olivo Bermeo, M. J. (2019) *Comparativas de software sig libre y comercial para estudios Ambientales*. Thesis. Pontifica Universidad Católica de Ecuador. Disponible en: <http://localhost/xmlui/handle/123456789/1974> (Accedido: 16 de enero de 2021).

OSGeo Project (2022) *PostGIS 3.3 Manual, PostGIS Manual*. Disponible en: <https://postgis.net/docs/manual-3.3/> (Accedido: 24 de octubre de 2022).

Palanisamy, S., Selvaraj, R., Ramesh, T. y Ponnusamy, J. (2019) "Applications of Remote Sensing in Agriculture - A Review", *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8, pp. 2270-2283. doi:10.20546/ijcmas.2019.801.238.

Pérez-García, C. A., Pérez-Atray, J. J., Hernández -Santana, L., Gustabello-Cogle, R. y Becerra-de Armas, E. (2019) "Sistema de Información Geográfica para la agricultura cañera en la provincia de Villa Clara", *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 13(2), pp. 30-46.

PostGIS, O. W. (2022) *PostGIS. Official Documentation, PostGIS*. Disponible en: https://postgis.net/docs/using_postgis_dbmanagement.html (Accedido: 1 de agosto de 2022).

QGIS Project (2022) *Module 16: Conceptos de Bases de Datos Espaciales con PostGIS — documentación de QGIS Documentation -, QGIS Official*

Documentation. Disponible en:
https://docs.qgis.org/3.22/es/docs/training_manual/spatial_databases/ (Accedido:
23 de octubre de 2022).

Reza, M. y Mohammad, A. (2015) "Application of Gis and Gps in Precision Agriculture (a Review)", *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, p. 9.

Rojas-Martínez, O., Rodríguez-Fajardo, A., Vázquez-Acuña, C., Pablos-Reyes, P. y Borrero-Reynaldo, Y. (2014) "Implementación de Un Sistema de Información Geográfica Para Las Decisiones En La Producción Cañera de Santiago de Cuba", *Ciencia en su PC*. Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago de Cuba, (2), pp. 42-55.

Ruiz Fernández, E. (2016) *Comparativa de software para la Realización de Simbolización Cartográfica*. Universidad de Oviedo.

Sambrekar, K. y Rajpurohit, V. S. (2019) "Fast and Efficient Multiview Access Control Mechanism for Cloud Based Agriculture Storage Management System", *International Journal of Cloud Applications and Computing (IJCAC)*. IGI Global, 9(1), pp. 33-49. doi:10.4018/IJCAC.2019010103.

Sánchez Fleitas, N., Comas Rodríguez, R., García Lorenzo, M. M., Sánchez Fleitas, N., Comas Rodríguez, R. y García Lorenzo, M. M. (2019) "Sistema Inteligente de Información Geográfica para las empresas eléctricas cubanas", *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*. Universidad de Tarapacá, 27(2), pp. 197-209. doi:10.4067/S0718-33052019000200197.

Sharma, R., Kamble, S. S. y Gunasekaran, A. (2018) "Big GIS analytics framework for agriculture supply chains: A literature review identifying the current trends and future perspectives", *Computers and Electronics in Agriculture*, 155, pp. 103-120. doi:10.1016/j.compag.2018.10.001.

Singh, A. (2019) "Remote sensing and GIS applications for municipal waste management", *Journal of Environmental Management*, 243, pp. 22-29. doi:10.1016/j.jenvman.2019.05.017.

Steiniger, S. y Hunter, A. J. S. (2013) "The 2012 free and open source GIS software map – A guide to facilitate research, development, and adoption", *Computers, Environment and Urban Systems*, 39, pp. 136-150. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2012.10.003.

Steiniger, S., Weibel, R. y Warf, B. (2010) "GIS software: a description in 1000 words", en *Encyclopedia of geography*. London, GB: Sage, p. online. doi:10.5167/uzh-41354.

Taloor, A. K., Thakur, P. K. y Jakariya, M. (2022) "Remote sensing and GIS applications in water science", *Groundwater for Sustainable Development*, p. 100817. doi:10.1016/j.gsd.2022.100817.

Vega, M. B., Febles, J. M. y Tolón, A. (2011) "Evaluación de la erosión potencial de los suelos mediante la metodología CORINE en distritos pecuarios de la provincia Mayabeque, Cuba", p. 7.

Vitturini, M., Fillottrani, P. R. y Castro, S. M. (2003) "Modelos de datos para datos espaciales", en *V Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*.

Zhang, F. y Cao, N. (2019) "Application and Research Progress of Geographic Information System (GIS) in Agriculture", en *2019 8th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)*. *2019 8th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)*, Istanbul, Turkey: IEEE, pp. 1-5. doi:10.1109/Agro-Geoinformatics.2019.8820476.

Zhou, W. (2021) "GIS for Earth Sciences", en Alderton, D. y Elias, S. A. (eds.) *Encyclopedia of Geology (Second Edition)*. Oxford: Academic Press, pp. 281-293. doi:10.1016/B978-0-08-102908-4.00018-7.