

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



**Sistema de Información Geográfica para la
aplicación de Técnicas Avanzadas de cultivo en la
caña de azúcar**

**Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en
Automática**

Autor: Ing. Carlos Alejandro Perez Garcia

Tutor: Dr. C. Luis Hernández Santana

M. Sc. Robby Gustabello Cogle

Santa Clara

2019

" Año 61 de la Revolución "

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



**Sistema de Información Geográfica para la
aplicación de Técnicas Avanzadas de cultivo en la
caña de azúcar**

**Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en
Automática y Sistemas Informáticos**

Autor: Ing. Carlos Alejandro Perez García

email: capgarcia@uclv.cu

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales,
FIE, UCLV

Tutor: Prof. Titular, Luis Hernández Santana

email: luishs@uclv.edu.cu

Prof. Auxiliar Robby Gustabello Cogle

email: robbly@uclv.edu.cu

Santa Clara

2019

"Año 61 de la Revolución"

PENSAMIENTO

“La llegada de los Sistemas de Información Geográfica, son el mayor avance en el manejo de la información geográfica desde la invención de los mapas”

Peter Burrough

DEDICATORIA

A mis padres,
por ser mis eternos profesores de la vida.

A mis hermanos Lenier y Armando,
por estar siempre a mi lado en todo momento.

A mis tíos y abuelos,
por su cariño.

A mi novia Lianet,
por todo su amor y dedicación.

A mis suegros Marisol y Evidio,
por hacerme sentir parte de su gran familia.

AGRADECIMIENTOS

A toda mi familia, los de sangre y de sentimientos por su apoyo incondicional y haber contribuido de una forma u otra con la realización de mi sueño.

A mis tutores por confiarme esta tarea y por el tiempo dedicado.

A mi profesor Wilfredo Rivero por ser crucial sus enseñanzas para toda mi vida.

A todas las nuevas amistades que encontré en el camino para la realización de esta tarea.

RESUMEN

La búsqueda de un punto de encuentro entre el aumento de la demanda de alimentos en el planeta y la creciente necesidad de un uso sostenible de los recursos naturales, constituye uno de los mayores desafíos de la Agricultura Mundial. Ello ha posibilitado el surgimiento de nuevas técnicas de gestión agrícola sobre la base del desarrollo tecnológico existente en áreas como las comunicaciones, la electrónica y los servicios de posicionamiento. En este contexto los Sistemas de Información Geográfica han jugado un papel fundamental permitiendo la implementación de prácticas agronómicas de avanzadas a través del análisis, visualización, e integración de datos geoespaciales. En Cuba, el desarrollo de plataformas de este tipo, ha estado limitado al uso de software pagos y con escasas funcionalidades. Es por ello que en el presente trabajo se desarrolla un Sistema de Información Geográfica basado en software libre con la capacidad de gestionar la información relacionada con las técnicas avanzadas de cultivo aplicadas actualmente a la caña de azúcar en nuestro país. Con este fin, se establecen las soluciones de software a emplear y se identifican las tecnologías de agricultura avanzada aplicadas en nuestro país. Como resultado queda diseñada la plataforma de gestión geográfica con una base de datos centralizada y posibilidad de acceso vía web. Además, es demostrada la efectividad del sistema, mediante un estudio de caso en áreas y procesos de la Empresa Azucarera Héctor Rodríguez de la provincia de Villa Clara.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vi
INTRODUCCIÓN	1
Organización del informe	5
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	6
1.1 Sistemas de Información Geográfica	6
1.1.1 Datos	6
1.1.2 Procesos	9
1.1.3 Tecnología	11
1.1.4 Visualización	12
1.2 Software de Sistemas de Información Geográfica basados en software libre	14
1.2.1 Sistemas de Información Geográfica libres más empleados	15
1.2.2 Geoportales	17
1.2.3 Sistemas Gestores de Bases de Datos Geoespaciales	18
1.3 Servicios Web Mapas.....	20
1.4 Aplicación de los SIG en la Agricultura	21
1.5 SIG en Cuba	23
1.5.1 Maquinarias Agrícolas de Avanzada	25
1.5.2 Percepción Remota	26
1.5.3 Máquinas de Riego	28

1.6	Consideraciones finales del capítulo.....	29
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.....		31
2.1	Arquitectura del sistema.....	31
2.2	PostgreSQL.....	32
2.3	Quantum GIS.....	33
2.3.1	Análisis Vectorial.....	34
2.3.2	Análisis Ráster.....	35
2.3.3	Conversión de ráster a vectorial.....	36
2.3.4	Conexión con servicios web de mapas.....	38
2.3.5	Conexión con base de datos.....	39
2.4	OpenGeo Suite.....	39
2.5	Imágenes aéreas.....	42
2.5.1	Fotogrametría Aérea.....	43
2.5.2	Imágenes Satelitales.....	44
2.5.3	Índices vegetativos.....	45
2.6	Datos de cosecha.....	47
2.6.1	Informes de Operación.....	50
2.7	Consideraciones finales del capítulo.....	50
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		52
3.1	Gestión de la información geoespacial.....	52
3.2	Empleo de servicios satelitales.....	54
3.2.1	Identificación de áreas sembradas.....	54
3.2.2	Cálculo del coeficiente de cultivo.....	56
3.2.3	Estimación de variables biofísicas.....	58

3.3	Sistema de toma de decisiones	59
3.3.1	Fiscalización de operaciones en el campo	60
3.3.2	Aplicación de dosis variable	61
3.4	Análisis económico y medioambiental	63
3.5	Consideraciones finales del capítulo	64
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		65
Conclusiones		65
Recomendaciones		66
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		67
ANEXOS		73
Anexo I		73

INTRODUCCIÓN

El creciente desarrollo de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones ha propiciado, entre otros, la diversificación de los servicios basado en internet, así como el aumento de las prestaciones de los equipos de cómputos y los servicios de posicionamiento. A su vez, estos avances han desencadenado un aumento cuantitativo y cualitativo de la información geoespacial disponible de disímiles sectores de la sociedad. En este sentido surgen los Sistemas de Información Geográfica (SIG) con el objetivo de registrar, analizar y visualizar de forma integrada los diferentes datos geoespaciales, proporcionados por el empleo de las nuevas tecnologías. Pese a que, en sus inicios, los SIG eran una tecnología meramente manejada por cartógrafos y geógrafos que intentaban suplir sus necesidades con el empleo de ordenadores; en la actualidad se han incorporado un gran número de otras disciplinas, entre las que se encuentran: el turismo (Li et al. 2015), la meteorología (Wang 2014) y la salud (Shi and Kwan 2015).

En aplicaciones agrícolas, los SIG posibilitan la implementación de prácticas agronómicas de avanzadas como: el manejo de la información georreferenciada de las parcelas, a partir de modelos digitales de mapas topográficos; el muestreo de los suelos y de cultivos, basado en imágenes aéreas; la orientación de las maquinarias agrícolas; entre otras. Además, estas plataformas permiten procesar los datos geoespaciales y ofrecer nuevas informaciones que tributen a diversas tareas agrícolas, como son la siembra, la fertilización y el monitoreo fitosanitario (Kamińska, Oldak, and Turski 2004).

El poder de los SIG reside en la capacidad de realizar trabajos que serían muy complejos con otros métodos como: comparar, analizar, medir o hacer búsquedas dentro de los datos espaciales. Todas estas funciones quedan bajo el control interactivo de un usuario que crea

los productos informativos que pueden transmitirse con absoluta precisión en forma de mapas digitales, informes en papel, representaciones esquemáticas o visualizaciones tridimensionales.

Entre los beneficios arrojados por la aplicación de los SIG en la agricultura, podemos mencionar:

- La precisión en la aplicación de productos fitosanitarios.
- El manejo de la densidad de siembra según las necesidades de cada lote o campo.
- La posibilidad de trabajar en condiciones de baja visibilidad, es decir, con lluvia, polvo, niebla u oscuridad.
- Optimización de la preparación de las parcelas para siembras futuras, según el conocimiento de los mapas de rendimientos.
- Sustitución de “señalizadores” humanos en las tareas de aplicación aérea de productos fitosanitarios.

En resumidas cuentas, los SIG mejoran el trabajo de los técnicos y productores agrícolas, al obtenerse resultados superiores a partir de la información recolectada. A su vez se reduce la obsolescencia de las maquinarias precisas por falta de conocimiento sobre sus potencialidades.

El cultivo de la caña de azúcar, constituye uno de los campos de aplicación más difundidos de los SIG. Ello ha estado amparado por posibilidad de obtener, a partir de las nuevas tecnologías, las variables básicas de las extensas áreas cultivables. A su vez esta información, facilita la determinación del estimado de producción, aspecto de gran importancia para sustentar la toma de decisiones administrativas enfocadas a la planeación estratégica del cultivo.

En Cuba, el empleo de SIG en áreas dedicadas a la producción de caña de azúcar, ha estado limitado al inventario de superficies (Rojas-Martínez et al. 2014), la cuantificación de los factores edáficos que limitan el desarrollo del cultivo (Rodríguez-Ortiz et al. 2010) y la sanidad vegetal (Balmaseda and Ii 2012). Es preciso añadir que la totalidad de los trabajos realizados hasta la fecha, se encuentran restringido al empleo de software propietario como

gestor de datos espaciales, el uso de ficheros locales como fuente de información y no se empelan las crecientes potencialidades de los servicios web. Consecuentemente, el desarrollo de un SIG con la capacidad de reutilizar la información geográfica manipulada actualmente en las diversas empresas azucareras del país, podría sentar las bases para la aplicación de técnicas avanzadas de cultivo. Estas actividades se encuentran aparadas además por la incorporación de maquinarias agrícolas del Sistema Avanzado de Cultivo (AFS, por sus siglas en inglés), la automatización de los sistemas de riego, el empleo de técnicas de percepción remota para la estimación de variables biofísicas y la detección de enfermedades de las plantas basada en fotogrametría aérea e imágenes satelitales. En este contexto, se hace necesario enfocar esfuerzos hacia la explotación exhaustiva de las nuevas tecnologías referidas con anterioridad y su gestión a partir de una única plataforma.

Por su parte, el Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP) de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV), de conjunto con la Estación Territorial de Investigaciones de la Caña de Azúcar de Villa Clara (ETICA), han venido utilizando técnicas avanzadas de cultivo en lo referente a: la explotación de los sistemas automatizados de las maquinarias agrícolas modernas (Perez-Garcia, Gustabello-Cogle, and Hernández-Santana 2018), la digitalización de las bases cartográficas destinadas al cultivo de la caña de azúcar (Becerras et al. 2008) y el empleo técnicas de percepción remota basados en las imágenes satelitales y vehículos aéreos no tripulados (VANT) (Kharuf-Gutierrez et al. 2018); con el fin de incrementar la capacidad de la toma de decisiones entorno a soluciones nacionales existentes.

Bajo esa tesitura, se plantea como **problema científico** de la presente investigación, la inexistencia en Cuba de un Sistema de Información Geográfica basado en software libres y con facilidad de acceso vía web, que permita la gestión integrada de la información geoespacial relacionada con las técnicas avanzadas de agricultura empleadas actualmente en el cultivo de la caña de azúcar.

Con el fin de darle solución al problema identificado se trazan como objetivos:

Objetivo General: Diseñar un Sistema de Información Geográfica basado en software libre que permita la gestión integrada de la información geográfica para la aplicación de prácticas de agricultura avanzada en la caña de azúcar.

Objetivos Específicos:

1. Establecer los fundamentos teóricos para el diseño de un Sistema de Información Geográfica en cuanto a la selección de las herramientas de software libre para su concepción y técnicas avanzada de cultivos a ser reflejadas.
2. Implementar la plataforma del Sistema de Información Geográfica para integración de la información geoespacial presente en la aplicación de técnicas avanzadas de cultivo en la caña de azúcar.
3. Valorar la funcionalidad del Sistema de Información Geográfica diseñado, en la gestión de las prácticas de agricultura avanzada en el Central Azucarero Héctor Rodríguez.

Para darle cumplimiento a cada uno de los objetivos enumerados anteriormente, se plantea desarrollar las siguientes **tareas de investigación:**

1. Análisis de la literatura especializada referente a los Sistemas de Información Geográfica.
2. Selección de las soluciones de software libre para el desarrollo del Sistema de Información Geográfica.
3. Caracterización de los procesos y tecnologías de agricultura avanzada actualmente aplicados al cultivo de la caña de azúcar.
4. Diseño de la plataforma de Sistema de Información Geográfica.
5. Demostración de las prestaciones del Sistema de Información Geográfica para la gestión de las prácticas de aplicación de técnicas avanzadas de cultivo en la caña de azúcar.

Como **hipótesis** de este trabajo se plantea: *un Sistema de Información Geográfica, basado en software libre, compuesto por un software de gestión, un Sistema Gestor de Bases de Datos y un geoportal, garantiza la gestión de la información geoespacial relacionada con las prácticas agronómicas de avanzada aplicadas actualmente al cultivo de la caña de azúcar, a partir de una única plataforma.*

Organización del informe

El presente informe está formado por: introducción, tres capítulos, conclusiones y recomendaciones para investigaciones futuras. Finalmente aparecen referencias bibliográficas y anexos.

CAPÍTULO 1: Se realiza un análisis de los principales aspectos relacionados con los Sistemas de Información Geográfica. Se abordan, además, los programas computacionales más empleados para el desarrollo de este tipo de plataformas y se presentan algunos casos de éxito de su utilización. Por último, se caracteriza los procesos y tecnologías presentes en Cuba, destinados aplicar técnicas de agricultura avanzada en el cultivo de la caña de azúcar.

CAPÍTULO 2: Se dedica a la descripción detallada de los diferentes elementos que componen la arquitectura del SIG objeto de estudio. Se presentan las configuraciones necesarias para articular la plataforma y se caracterizan las fuentes de información a emplear, como bases para los correspondientes análisis.

CAPÍTULO 3: Se presenta algunas de las funcionalidades del Sistema de Información Geográfica propuesto, enfocadas a potenciar el desarrollo de técnicas de agricultura avanzada aplicadas actualmente al cultivo de la caña de azúcar; a partir de un estudio de caso mostrado en áreas y procesos del Central Azucarero Héctor Rodríguez, de la provincia de Villa Clara.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo, se abordan los aspectos conceptuales relativos a los Sistemas de Información Geográfica, haciendo énfasis en los elementos que los componen y su integración con las técnicas de agricultura avanzada. Adicionalmente, se evalúan las soluciones de software existentes dirigido a concebir el planteamiento de la hipótesis. Por último, se analizan los procesos agricultura avanzada aplicadas al cultivo de la caña de azúcar en nuestro país.

1.1 Sistemas de Información Geográfica

Existen varias definiciones de SIG, una de las más difundidas es la de (Olaya 2014), quien define que un SIG es un elemento complejo que engloba una serie de otros elementos conectados, cada uno de los cuales desempeña una función particular. Estos elementos son: los datos, los procesos, la tecnología y la visualización. Ello permite el procesamiento de la información geográfica con el fin de presentar a los usuarios finales nuevos datos calculados indirectamente de conjunto con otras fuentes de información.

1.1.1 Datos

Los datos son el elemento principal del trabajo en un SIG. Estos son una representación simplificada de la realidad proporcionada por las diferentes fuentes de información geográfica disponible. Por ello, un aspecto clave para la efectividad de un SIG es la posibilidad de integrar datos de distinta procedencia.

Para la codificación y representación de la información geográfica se han empleado, desde los primeros SIG, dos modelos: el vectorial y el ráster (Figura 1.1).

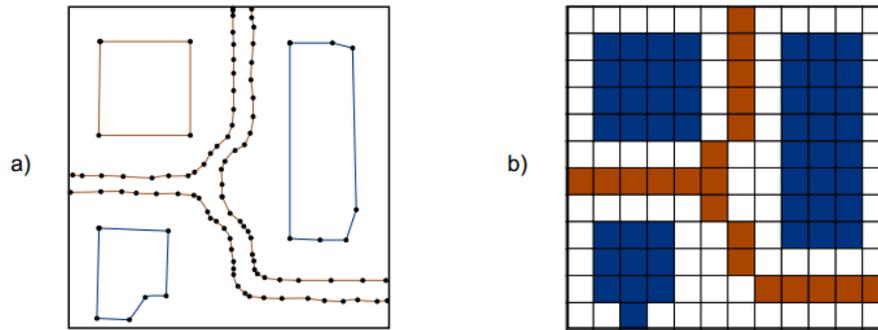


Figura 1.1 Representación vectorial (a) y ráster (b) de un mismo elemento

Los modelos vectoriales acopian la información geoespacial de un área mediante entidades geométricas donde las características sean constantes. Estas entidades están compuestas por tres estructuras básicas: puntos, líneas y polígonos.

- La geometría puntual puede usarse para definir elementos separados y de poca dimensión relativamente para los propósitos del mapa.
- Las líneas se usan para representar objetos generalmente alargados tales como ríos y carreteras.
- Los polígonos son usados para representar áreas o superficies, por ejemplo, parcelas, huellas de edificios, la reglamentación de uso de un territorio y el área de un municipio.

Toda geometría del modelo ráster puede reducirse en última instancia a puntos. De este modo las líneas son el conjunto de puntos interconectados en un determinado orden y los polígonos son líneas cerradas, también representables como una serie de puntos.

Por su parte, los modelos ráster dividen la zona de estudio, de forma homogénea, en una serie de unidades mínimas de representación conocidas usualmente como celdas. Ellas constituyen los entes almacenadores de información temática de cada representación de este tipo. La división del espacio en celdas es llevada a cabo de forma sistemática de acuerdo a un patrón específico, de tal modo que existe una relación implícita entre sí, ya que estas son contiguas, cubren todo el espacio y no se solapan. Por tanto, la posición de cada celda depende de las restantes, lo que da paso a la confección de una malla regular.

La gran mayoría de los modelos ráster emplean unidades mínimas de forma cuadrada, aunque también pueden ser formas rectangulares, triangulares o incluso hexagonales. Otra característica del modelo ráster es que no se recogen de forma explícita las coordenadas de cada una de las celdas, sino tan solo los valores de estas. No resulta necesario acompañar a dichos valores de un emplazamiento espacial concreto, pues hacen referencia a un elemento particular de la malla, la cual representa una estructura fija y regular. No obstante, sí que es necesario emplazar dicha malla en el espacio para después poder calcular las coordenadas particulares de cada celda.

El otro parámetro requerido junto con la orientación de la malla y la situación geográfica de una de sus celdas es el denominado tamaño de celda o tamaño de *píxel*, también conocido como resolución. Es preciso señalar que mayores tamaños de celda implica una menor resolución y viceversa.

Un SIG eficaz debe ser capaz de manejar todo tipo de datos geográficos con independencia del modelo. De ahí que, el uso indistintamente de imágenes ráster o vectoriales recae en el contexto de aplicación.

Entre los aspectos a tener en cuenta para la selección de uno u otro modelo, podemos mencionar:

- **Precisión:** El modelo ráster tiene su precisión limitada por el tamaño de celda. Las entidades menores que dicho tamaño de celda no pueden recogerse y la variación espacial que sucede dentro del espacio de la celda tampoco. Así mismo, existe una imprecisión en las formas, ya que el detalle con el que puede recogerse la forma de una entidad geográfica según el modelo vectorial es ilimitado. Por otra parte, en el modelo ráster, las formas se restringen a ángulos rectos, ya que la unidad base es un cuadrado.

Es preciso señalar que, cuando dentro de una celda el valor de la variable recogida no sea constante, da lugar a la existencia de ambigüedades como la mostrada en la Figura 1.2. Se puede apreciar que una celda está ocupada por dos valores distintos, pero solo puede asignársele uno de ellos. Por cuanto deben establecerse criterios sistemáticos para llevar a cabo la interpretación de la información.

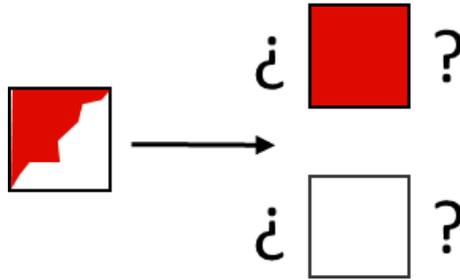


Figura 1.2 Ambigüedad de asignación de valores en una celda

La precisión de la representación vectorial es, precisamente, la representación en sí pero no del dato contenido en las mismas; dependiendo este último de otras condicionantes tales como la escala de trabajo.

- **Volumen de almacenamiento:** Para el caso de los modelos ráster, toda la superficie a representar se encuentra dividida en las mismas unidades, independientemente de la complejidad de la variable en cada punto o de la necesidad de estudiarla con mayor o menor detalle en unos que en otros. Por ello el número de elementos a almacenar es superior que su equivalente vectorial, el cual es más adecuado para la representación de entidades discretas.
- **Complejidad:** La regularidad de los modelos ráster constituye la característica fundamental que posibilita la implementación de algoritmos de análisis como el uso combinado de varias capas. Esto se debe a que una capa ráster puede ser comprendida como una matriz y, por tanto, la aplicación de herramientas sobre esta se realiza de forma homogénea a toda la capa. Si bien esta estructura resulta relativamente fácil para la aplicación de determinados algoritmos, las ejecuciones de los mismos suelen ser costosos en términos de tiempo por la necesidad de aplicarlos sobre un número muy elevado de celdas y un gran volumen de datos. En cambio, la irregularidad espacial de las capas vectoriales, provocan que la implementación de los algoritmos sea de mayor complejidad.

1.1.2 Procesos

El análisis de los datos geográficos, constituye una de las tareas fundamentales de todo SIG. Estos datos contienen un cúmulo de información que no siempre puede ser identificada a

simple vista, de ahí que se requiera la realización de procedimientos que permitan leer la información implícita en ellos.

De forma general, un análisis espacial puede ser definido como el conjunto de procesos que posibilitan el estudio cuantitativo de aquellos fenómenos que se manifiestan en el espacio (Anselin 1989). Entre los procesos más empleados, podemos mencionar:

- **Consulta Espacial:** Constituye el análisis más simple, ya que es la consulta directa de la información que contienen los datos espaciales. Es el tipo de análisis básico usado cuando se trabaja con cartografía clásica que proporciona información inmediata a partir de una simple observación de los datos. La propiedad fundamental empleada es la posición de cada elemento geográfico.
- **Análisis Topológico:** Son las consultas realizadas a capas de datos espaciales relacionadas no solo con su posición, sino con otros elementos presentes en la misma. Estos análisis posibilitan filtrar la información geoespacial en base a características comunes de cada entidad.
- **Medición:** La existencia de una referencia espacial de las diversas capas de un SIG, da paso a la realización de consultas con el fin de cuantificar parámetros espaciales de las diferentes entidades. Entre estos podemos referir, el cálculo de: área, perímetro, factor de forma, entre otros.
- **Combinación:** La propia estructura en capas de los SIG, les ha convertido en plataformas ideales para llevar a cabo análisis donde se combina información sobre diversas variables. Las operaciones de combinación posibilitan integrar la información de varias capas en formas muy distintas, y las nuevas capas resultantes pueden luego analizarse con sencillez independientemente de su origen, como una capa más.
- **Análisis de Superficie:** Con base a parámetros básicos de las entidades espaciales como la pendiente y la orientación, surgen los análisis de superficie como uno de los más potentes dentro de los SIG. Pese a que por este análisis se entiende solamente como el análisis de la superficie terrestre; gran parte de estas operaciones pueden aplicarse a cualquier otra superficie, entendiendo esta, en su sentido matemático.

Variadas son las formas que posee un SIG para realizar consultas como las referidas con anterioridad. Las expresiones lógicas relativas a la información temática de las capas, constituye una de las formas más difundidas por su sencillez de ejecución; donde las respuestas son aquellas entidades que hacen verdadera dicha expresión, o que es conocido también como selección. Esta puede utilizarse posteriormente, como base a la realización de otro análisis, o simplemente presentar al usuario la información seleccionada ya sea en forma de capas de datos geográficos, tablas o vectores.

1.1.3 Tecnología

La integración de aplicaciones en una misma plataforma constituye hoy en día una tendencia de los programas computacionales en general. Los SIG, figuran como uno de los principales ejemplos de esta propensión, ya que actúan como un elemento de unión de todas las tecnologías y abarca además las herramientas para manipular los datos geoespaciales. Aun así, existen aplicaciones destinadas al uso en una determinada disciplina, en las que la aplicación conserva solo aquellas capacidades que resulten de mayor interés para el objeto de esta. Los programas computacionales de este tipo pierden el carácter genérico y versátil del SIG y normalmente integran tecnologías dentro del marco de trabajo concreto de la disciplina correspondiente.

De forma general, los SIG pueden ser divididos en dos grandes grupos: las herramientas de escritorio y los clientes web. Los SIG de escritorios constituyen programas instalados a escala local en los ordenadores de los usuarios. Cabe señalar que estas herramientas son soluciones completas que cubren la totalidad de necesidades que se presentan en el desarrollo de proyectos. Por su parte, los clientes web basan su núcleo de procesamiento en servicios de internet, lo que a su vez suple las deficiencias de equipamiento de los usuarios y proporciona mayor difusión de la información geográfica.

Las redes son la vía para la difusión de todo tipo de información, entre ella la información geográfica. Los datos espaciales pueden ofrecerse a través de una red de la misma manera que se ofrecen otro tipo de datos como imágenes o texto en una página web. Para que en este proceso se maximicen las posibilidades que los datos ofrecen, es necesario disponer de tecnologías basadas fundamentalmente en las redes, pero particularizadas al tipo de datos concreto que se maneja y los posibles usos que pueden darse. Estas tecnologías, han

evolucionado paralelamente a otras basadas en la web, añadiendo progresivamente elementos tales como:

- No es necesario un software de procesamiento específico, ya que no ha de instalar nada adicional en su ordenador. Acceder a cartografía remota e incluso a funcionalidades avanzadas basadas en datos sin requerirse más que un simple navegador web, algo presente en cualquier ordenador.
- Perfil menos técnico, pues proporciona facilidades para la creación y edición de la información geoespacial independientemente de su especialización.
- Potenciamiento del trabajo colaborativo, puesto que la red es un punto de encuentro que favorece la colaboración. Los SIG dejan de ser algo personal reducido al ámbito de un ordenador o una pequeña red, para ser un ente global con múltiples conexiones.
- Independencia del sistema, por cuanto un mapa web puede verse y usarse del mismo modo en cualquier ordenador, con independencia del sistema operativo, el navegador e incluso el dispositivo empleado.

1.1.4 Visualización

La visualización es una función fundamental dentro de los SIG, ya que nos ofrecen una concepción particular del espacio geográfico y sus atributos. Aunque existen SIG que no incorporan capacidades de visualización o estas no son muy avanzadas, la gran mayoría de estas herramientas incluyen un gran número de elementos para representar los datos geográficos con los que se trabaja. Desde los primeros SIG, la visualización ha evolucionado e incorporado nuevas capacidades; las cuales requieren de elevadas prestaciones gráficas de los ordenadores actuales, dotándose así, mayores posibilidades de personalización.

Para facilitar la visualización de la información geográfica, los SIG emplean las capas como elemento divisor de los datos exhibidos. Las capas posibilitan analizar simultáneamente distintos tipos de información como por ejemplo, la contenida en un mapa topográfico y la existente en un mapa de tipos de suelo. Ello está sustentado en la posibilidad de dividir la información geoespacial referida a una zona de estudio en varios niveles; de tal forma que, pese a coincidir sobre un mismo emplazamiento la información sobre distintas variables, se

encuentra recogida de forma independiente. Es decir, en función de la componente temática se establecen distintos bloques de datos espaciales.

Es preciso plantear que la visualización de una capa dentro de un SIG es independiente de la información contenida en la misma o la forma en que esta se almacena. El dato geográfico y su representación van por separado. El primero no define la representación en sí, sino que únicamente le sirve como apoyo. Esto es particularmente cierto para el caso de capas vectoriales y ráster que contengan un valor de tipo no gráfico. En dicho caso la capa tendrá el mismo aspecto independientemente de los SIG en los que se utilice, puesto que la información relativa a su representación está contenida en la propia imagen. Para garantizar esta funcionalidad, se ha establecido la Descripción Estándar de Capa (SLD, por sus siglas en inglés) como forma de almacenar los parámetros de representación de los datos geográficos. Esta descripción, agrupa la representación de las imágenes en cuatro formas fundamentales:

- Malla de celdas regulares: en este caso, cada celda tiene un valor que corresponde a las características de la zona ocupada; luego al convertirse en diferentes escalas de colores, da lugar a una imagen.
- Red de Triángulos Irregulares: no son más que una estructura en la cual se toman los puntos más característicos y en base a ellos se construye una teselación¹ en triángulos con condiciones particulares.
- Puntos regulares: constituye una serie de puntos regularmente espaciados que contienen la información temática.

En la Figura 1.3 se exhibe las diferentes formas de representación de las imágenes. Para este caso, se empleó el modelo de elevación de una zona ya que es una variable continua y puede concebirse mediante un campo escalar.

¹ El término *teselación* hacen referencia a una regularidad o patrón de figuras que recubren o pavimentan completamente una superficie plana que cumple con los requisitos de no dejar espacios y que no superpongan las figuras.

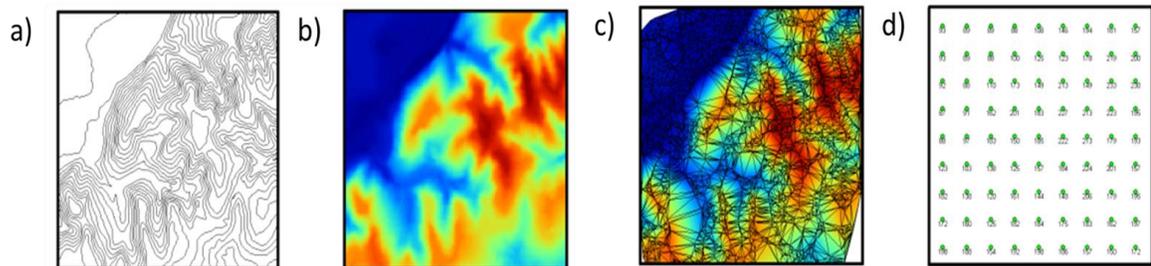


Figura 1.3 Modelo digital de elevaciones representado con a) curvas de nivel, b) malla de celdas regulares, c) red de triángulos regulares y d) puntos regulares

1.2 Software de Sistemas de Información Geográfica basados en software libre

El acceso al código fuente y la posibilidad de modificar los programas informáticos sin restricción alguna, constituye algunas de las ventajas que han permitido la expansión de los software libres a disímiles aplicaciones de la sociedad (Gonzalez Ruiz 2014). No obstante, las soluciones privativas en muchos casos poseen prestaciones específicas de determinadas aplicaciones. Es por ello que, desde sus comienzos, los paradigmas de SIG han estado divididos en dos modelos de desarrollo: los libres y los propietarios. En los primeros, el código fuente es típicamente publicados bajo licencias de software y los usuarios finales, tienen la posibilidad de estudiar el funcionamiento del programa, incluirle modificaciones e incluso redistribuir copias del mismo. En cambio, los SIG propietarios, generalmente son distribuidos bajo costosas licencias y no se permite realizar modificaciones al programa (Granell, Díaz, and Gould 2010).

La Conferencia para el Software Libre Geoespacial (FOSS4G, por sus siglas en inglés), ha sido la principal promotora del desarrollo de SIG gratuitos y de código abierto de este ramo. En ese sentido, se han creado múltiples acuerdos de licencia para guiar el desarrollo y la distribución de este tipo de software, como son: *Mozilla Public License* (MPL), *Massachusetts Institute of Technology License* (MIT) y la *GNU General Public License* (GPL). Dichos acuerdos, usualmente establecen diferentes grados de apertura en la trazabilidad del código fuente, la exclusión de patentes y los intereses comerciales de los usuarios y desarrolladores del código (Gangadharan et al. 2012).

Por su parte, el Consorcio Geoespacial Abierto (OGC, por sus siglas en inglés), surge para garantizar una compatibilidad entre los diferentes productos de software libre; el cual ha sido pionero en el desarrollo de estándares para facilitar la interoperabilidad de los datos geoespaciales en todas las plataformas. OGC ha sido un enlace para coordinar los esfuerzos de la industria, el gobierno y la academia en estándares abiertos para apoyar la investigación de la información geográfica, el desarrollo de software y varios servicios geográficos (Sui 2014). Según (Percivall 2010), dos de las especificaciones claves implementadas por OGC son: las especificaciones de implementación, que proporcionan métodos estándar para que los sistemas compartan datos de características e imágenes de diversos tipos de información geoespacial; y las de catálogo, que proporcionan los métodos para publicar y descubrir datos geoespaciales en la web.

1.2.1 Sistemas de Información Geográfica libres más empleados

Tradicionalmente el núcleo de procesamiento de todo SIG está basado en potentes programas computacionales que implementan herramientas para llevar a cabo las tareas básicas del trabajo con datos geográficos: creación, edición, manejo y análisis.

El Sistema de Soporte a Análisis de Recursos Geográficos (GRASS, por sus siglas en inglés), es reconocido como el primer SIG basado en software libre. Este proyecto sigue un paradigma de desarrollo de código abierto típico, donde el código fuente es el resultado del trabajo de desarrolladores pagados y voluntarios. Para los usuarios finales, este modelo de desarrollo proporciona software de alta interoperabilidad y calidad sin costo alguno; donde las nuevas funciones y algoritmo recién publicado, puede implementarse inmediatamente en la versión de desarrollo. GRASS incluye más de 350 módulos para gestión, procesamiento, análisis y visualización de datos georreferenciados. Además, es un SIG modular con datos organizados como coberturas ráster y vectoriales. Incluye herramientas para el modelado espacial, la gestión y análisis de datos geoespaciales y el procesamiento de imágenes satelitales (Neteler et al. 2012).

Otro de los SIG de mayor renombre internacional es GvSIG, el cual está destinado a trabajar con fuentes información de una gran diversidad, tanto en formato ráster como vectorial. Posee, al igual que GRASS una arquitectura modular y está regido por los estándares de la OGC. El software GvSIG, se encuentra disponible para los usuarios en dos versiones:

Escritorio (*Desktop*) y Móvil (*Mobile*). La primera, posee toda una serie de herramientas que le permiten acceder a servicios remotos, conexión con bases de datos espaciales, edición de la información geográfica (navegación, consulta, selección, etc.), así como la impresión y publicación de mapas. En cambio, la versión Móvil es una plataforma idealizada para proyectos de captura y actualización de datos en campo. Se caracteriza por disponer de una interfaz amigable, siendo capaz de acceder a los formatos más comunes y cuenta con un amplio número de herramientas ideales para trabajar con información de naturaleza geográfica (Leroux et al. 2018).

El Sistema Automatizado de Análisis Geocientífico (SAGA, por sus siglas en inglés), es un software de procesamiento que incluye un gran conjunto de algoritmos geocientíficos y es especialmente potente para el análisis de Modelos Digitales de Elevaciones (DEM, por sus siglas en inglés). A partir de SAGA, es posible calcular la mayoría de los parámetros y objetos de la superficie terrestre en diferentes contextos. Desarrollado desde 2001 por la Universidad de Göttingen en Alemania; SAGA ha permitido simplificar la implementación de nuevos algoritmos para el análisis de datos espaciales dentro de un marco que permita de inmediato su aplicación operativa. Esta característica, lo ha convertido en una herramienta fácil y de efectiva implementación de algoritmos espaciales (Conrad et al. 2015).

Quantum GIS (QGIS), constituye otro software referente dentro de los usuarios de la geomática en general. Distribuido bajo una Licencia Pública General de GNU, se encuentra disponible para plataformas como: GNU/Linux, Unix, Mac OS y Microsoft Windows. QGIS, permite manejar datos en formatos ráster y vectoriales a través de las bibliotecas de Abstracción de Datos Geoespaciales (GDAL, por sus siglas en inglés) y de Características Simples (OGR, por sus siglas en inglés). Posee conectividad con los gestores de bases de datos libres y propietario más empelados por los usuarios de las geomática. Además, integra funcionalidades heredadas de otros SIG reconocidos como GRASS y SAGA (Garay and Agüero 2013).

El aumento de las conexiones a internet y los servicios de procesamiento en la nube, representan una naciente tecnología que aumenta a diario su campo de aplicación. Es por ello que sea un denominador común, en la mayoría de los SIG, la presencia de una versión web del software de escritorio con su correspondiente compatibilidad con los servicios web de

mapas. Es preciso señalar que ambas tecnologías (web y escritorio) son complementarias y tienen una relación simbólica; ya que los software de escritorio son destinados para la creación, manipulación y análisis de los datos espaciales, mientras que los geoportales están destinados a aumentar la distribución y accesibilidad de los mismos.

1.2.2 Geoportales

La integración de SIG y la tecnología de Internet, ha dado lugar a creación de los Geoportales o web GIS, como también son conocidos. Estos, según (Maguire and Longley 2005), constituyen el punto de entrada de los SIG a los diferentes servicios disponibles en internet. Ello a su vez, ha potenciado la diversificación de los datos geoespaciales y sus aplicaciones en la planificación. Esta combinación ofrece además grandes posibilidades como el acceso interactivo a datos geoespaciales, integraciones, transmisión de datos en tiempo real y el mejoramiento de las funciones de la información geográfica.

De forma general, los geoportales proporcionan una interfaz centralizada y uniforme para acceder a los recursos y servicios de datos distribuidos (Karnatak et al. 2007). La mayoría de los geoportales de SIG disponibles en Internet están diseñados para temas específicos y por tanto, están dirigidos a clases específicas de usuarios.

Una aplicación web de un SIG, permite a los usuarios procesar su información geográfica sin tener siquiera los datos o software especializados instalados en su ordenador. Sin embargo, una de las ventajas más importantes de esta tecnología, es su naturaleza dinámica, ello está dado por las potencialidades de acceso y actualización de la información geoespacial, por parte de los clientes.

Un SIG web es el resultado de la integración funcional de un servidor de mapas, un servidor web y una base de datos geoespacial. Con el fin de integrar todos estos elementos en un único entorno de desarrollo, se han creado plataformas de desarrollo web como:

- *OpenLayer*: Es una plataforma de código abierto que posibilita la creación de mapas web interactivos, con la capacidad de personalizar todos los aspectos del mismo: capas, controles, eventos, entre otros. Su resultado final puede ser consumido en la gran mayoría de navegadores web.

- *Leaflet*: es otra de las plataformas más empleadas para la creación de mapas interactivos. Posee una estructura modular, lo que le ha proporcionado ser una herramienta, extremadamente ligera. La incorporación de funcionalidades se realiza a partir de la instalación de complementos.
- *GeoTools*: es una herramienta de código abierto basado en Java que proporciona métodos que cumplen con los estándares para la manipulación de datos geoespaciales.
- *OpenGeo*: es otra de las estructuras más empleadas para la creación de geoportales. Posee una interfaz amigable que le permite configurar las diferentes herramientas de una forma muy intuitiva; por lo que no se requieren grandes conocimientos de programación para emplearlo.

1.2.3 Sistemas Gestores de Bases de Datos Geoespaciales

La construcción de una base de datos geográfica implica un proceso de abstracción para pasar de la complejidad del mundo real a una representación simplificada que pueda ser procesada por el lenguaje de los ordenadores. Este proceso de abstracción tiene diversos niveles y normalmente comienza con la concepción de la estructura de la base de datos, generalmente en tablas. En esta fase y dependiendo de la utilidad que se vaya a dar a la información a compilar, se seleccionan los campos a incluir en cada temática.

Un Sistema Gestor de Base de Datos (SGBD, por sus siglas en inglés) pueden definirse como un paquete generalizado de software que se ejecuta en un sistema computacional anfitrión, centralizando el acceso a los datos y actuando de interfaz entre los datos físicos y el usuario. Las principales funciones que debe cumplir un SGBD se relacionan con la creación y mantenimiento de la base de datos, el control de accesos y la manipulación de información de acuerdo con las necesidades del usuario (Suprem, Mahalik, and Kim 2013).

La evolución de SGBD hacia la incorporación de extensiones para el manejo de datos espaciales obedece a la necesidad de gestionar, de forma integrada tanto los datos descriptivos como los datos espaciales o geométricos de los objetos que los componen. Los Sistemas Gestores de Bases de Datos Espaciales (SGBDE, por sus siglas en inglés) constituyen un aspecto clave para proveer a los SIG las potencialidades de: recuperar, compartir e integrar la información geoespacial. Para el manejo de los tipos de datos y la

incorporación de nuevas funciones que permiten la selección, se emplea el Lenguaje Estructurado de Consulta (SQL, por sus siglas en inglés). Este posibilita realizar las consultas, no solo a partir de criterios alfanuméricos, sino también aplicando reglas espaciales a través de relaciones topológicas, de orientación, medición, entre otras (Rigaux, Scholl, and Voisard 2002).

Una base de datos geoespacial proporciona métodos de acceso, comúnmente conocidos como índices, para viabilizar la ubicación de los datos. El orden natural de los números, cadenas y fechas dentro de un base de datos es fácil de determinar: cada valor es menor que, mayor que o igual a cualquier otro valor. Sin embargo, debido a que las geometrías de la información espacial (punto, línea y polígono) se pueden superponer o simplemente pueden estar contenidos uno dentro de otro, de ahí que el empleo de índices espaciales garantiza el acceso a la información solicitada. Estos índices posibilitan el ordenamiento de la información teniendo en cuenta qué objetos están dentro de un cuadro delimitador en particular, llamado *bounding box*; siendo este último el rectángulo más pequeño capaz de contener una determinada geometría.

Entre los SGBDE más difundidos por los usuarios de las técnicas de la geomática, se encuentran:

- *Oracle Spatial*: es un sistema de gestión de base de datos relacional (SGBDR, por sus siglas en inglés) considerado como uno de los software de su tipo más completos. Dicho programa está integrado por una base de datos de alto rendimiento, a escala empresarial, espacial y gráfica denominada *Oracle Database*. Es compatible con aplicaciones empresariales, inteligencia empresarial, sistemas de información geográfica a gran escala y servicios de ubicación. *Oracle Spatial* es considerada como una base de datos gráfica de propiedades de propósito general y características analíticas que soportan aplicaciones para redes sociales, Internet de las cosas, detección de fraudes y sistemas de recomendación. Además, posee una base de datos de gráficos RDF para fines especiales con capacidad de vincular datos entre otras aplicaciones. Las características espaciales en *Oracle Spatial* ofrecen capacidades avanzadas que abordan todas las formas de cargas de trabajo espaciales y conjuntos de datos en la base de datos *Oracle*.

- *MySQL* es, al igual que *Oracle* un SGBDR, basado en SQL, que se ejecuta en prácticamente todas las plataformas, incluidos Linux, UNIX y Windows. Aunque *MySQL*, se puede usar en una amplia gama de aplicaciones, se asocia a menudo con aplicaciones web y publicaciones en línea. Los desarrolladores pueden usar *MySQL* bajo la Licencia Pública General de GNU (GPL), pero las empresas deben obtener una licencia comercial de *Oracle*. Hoy en día, *MySQL* es el SGBDR detrás de muchos de los sitios web más importantes del mundo e innumerables aplicaciones web orientadas al consumidor y corporativas, como Facebook, Twitter y YouTube.
- PostgreSQL: Es un proyecto orientado a objetos, libre y multiplataforma que incluye herencia entre tablas e incorpora una estructura de datos en forma de arreglo. Es un DBMS objeto-relacional que permite obtener una mejor respuesta en ambientes de grandes volúmenes trabajo. Tiene una serie de bibliotecas escritas en JavaScript para la construcción de aplicaciones interactivas. Brinda también, soporte nativo para los lenguajes más populares del medio: PHP, C, C++, Python, Java/JDBC, entre otros (Montesinos-Lajara and Sanz-Salinas 2008). Además, se puede afirmar que es el sistema insignia en el ámbito de los SGBDE gracias a la incorporación de su módulo PostGIS, que le proporciona la capacidad no solo de almacenar información geoespacial, sino de realizar operaciones de análisis geográfico.

La selección de una tecnología u otra, depende de factores como el tipo de datos manejados, las fuentes de información disponibles y los costos asociados; donde las organizaciones pueden elegir comprar, licenciar, recopilar o convertir los datos espaciales necesarios. Para todo ello, se hace necesario tener una especificación de datos detallada con la que comparar alternativas. Si la organización está desarrollando o convirtiendo los datos en sí, la especificación detallada proporciona las pautas para realizar esas tareas.

1.3 Servicios Web Mapas

El desarrollo de los servicios web en torno al empleo de tecnologías y protocolos que facilitan el intercambio de información entre los usuarios, ha dado paso en la implementación de geoservicios. Estos no son más que servicios web basado en estándares que posibilitan la

publicación de información geográfica, siendo el OGC el encargado de definirlos y de garantizar su interoperabilidad (Shengru Tu et al. 2006).

El Servicio Web de Mapas (WMS, por sus siglas en inglés) devuelve una imagen con información geográfica (coordenadas, formato y proyección) que se encuentra en un servidor. Este servicio, define un mapa como una representación de la información geográfica en forma de un archivo de imagen digital, la cual es conveniente para la exhibición en una pantalla de ordenador. Los mapas producidos por WMS se generan normalmente en un formato de imagen como PNG, GIF o JPEG.

El estándar WMS, define tres operaciones fundamentales:

1. *GetCapabilities*: Devolver metadatos del nivel de servicio.
2. *GetMap*: Devolver un mapa cuyos parámetros geográficos y dimensionales han sido bien definidos.
3. *GetFeatureInfo*: Devolver información de características particulares mostradas en el mapa.

Las operaciones WMS pueden ser solicitadas usando un navegador estándar realizando peticiones en la forma de Localizador Uniforme de Recursos (URL, por sus siglas en inglés). El contenido de tales URL depende de la operación solicitada. Concretamente, al requerir un mapa, la URL indica qué información debe ser mostrada, qué porción de la tierra debe dibujar, el sistema de coordenadas de referencia, así como el ancho y la altura de la imagen de salida. Cuando dos o más mapas se producen con los mismos parámetros geográficos y tamaño de salida, los resultados se pueden solapar para producir un mapa compuesto.

1.4 Aplicación de los SIG en la Agricultura

Un SIG integra hardware, software y datos para capturar, administrar, analizar y mostrar todas las formas de información geográficamente referenciada. Estos sistemas pueden realizar funciones analíticas complicadas y luego presentar los resultados visualmente como mapas, tablas o gráficos. Ello permite, a los responsables de la toma de decisiones, comprender, de forma visual los problemas que tienen ante sí y luego seleccionar el mejor curso de acción.

Analizar el manejo de los insumos, las operaciones agrícolas de las maquinarias y el rendimiento de los cultivos en una granja es fundamental para su éxito y rentabilidad. La capacidad de SIG para examinar y visualizar los entornos agrícolas y los flujos de trabajo ha demostrado ser muy beneficiosa para aquellos involucrados en la industria agrícola. En este sentido, tomar decisiones basadas en la geografía, es un elemento básico de todo desarrollo.

La aplicación de los SIG en sectores como la agricultura, asiste a sus a diversas actividades, como son:

- Localización instantánea de parcelas para cultivo.
- Obtención de medidas de las longitudes perimetrales y áreas de superficie de parcelas.
- Establecer los límites de las parcelas, de manera que se integre con la realización de solicitudes y declaraciones.
- Realización de estudios comparativos de las parcelas en un área específica, en función de su variedad, año de plantación o condición; permitiendo identificar, visualmente, los grupos con características similares se identifican mediante diferentes colores.
- Almacenar la información resultante de las actividades agrícolas en bases de datos.

El uso de los SIG por parte de los agricultores, constituye una poderosa herramienta para la administración de las áreas cultivables mediante la creación de informes y mapas con gran cantidad de información que les brindan una perspectiva única de sus operaciones.

En un mapa de un área agrícola, una capa podría representar los límites de un pedazo de tierra, una segunda capa de tipos de suelo, otro es el rendimiento del cultivo o un tratamiento específico del suelo y aún otro, el riego. Los SIG pueden mostrar, por ejemplo, cómo las relaciones entre el tipo de suelo, el fertilizante y el agua afectan el rendimiento del cultivo en un área determinada. A su vez, esta representación podría sugerir soluciones precisas para el manejo del suelo, encaminadas a incrementar el rendimiento del cultivo.

De forma general, se reportan trabajos relacionados con la aplicación de los SIG en la agricultura como el de (Ye et al. 2013), quienes presentan los resultados de la aplicación del Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) y los SIG basados en web en una granja ecológica. Proponen un modelo de gestión de Agricultura Avanzada basado en cuatro

plataformas: la de infraestructura de información espacial, la de IoT, la de gestión de agricultura y el cliente móvil. El sistema ayudó al personal a reducir el tiempo de monitorización de los cultivos al presentar información en tiempo real, mejorando así la rentabilidad de los mismos.

Por otra parte, en (Keating and McCown 2001), los autores analizan la evolución de diferentes elementos relacionados con cultivos, suelos, clima, personas, metas, objetivos y toma de decisiones; de donde se centran en seis tipos de análisis de sistemas agrícolas. Los resultados obtenidos son evaluados en escenarios diferentes con cultivos diferentes.

De modo semejante, en (Driemeier et al. 2014) se describe un análisis de estimación del ruido, de autocorrelación espacial y de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés); de datos referentes a la diversidad del suelo y atributos del cultivo, medidos por técnicas de Agricultura Avanzada. Obteniéndose como resultado altos valores de correlación en diversas variables como, por ejemplo: la distribución espacial del rendimiento cañero, la composición nitrogenada de las plantas y la concentración de pH en el suelo.

Igualmente, en (Wang et al. 2009), se propone un sistema de monitorización de información basado en arquitectura abierta, formada por redes de sensores junto con una plataforma de información del servicio. Los sensores capturan y reportan información entre ellos y la transmiten mediante señales inalámbrica hacia una plataforma de información; siendo esta última la encargada de general los reportes para informar a los usuarios del sistema.

1.5 SIG en Cuba

Cuba, no ha quedado exenta del desarrollo de SIG que respondan a diferentes contextos de aplicación. Muestra de ello son los trabajos realizado por la agencia de software GeoMIX adscrita a la empresa GEOCUBA en el desarrollo de un servidor de mapas basado en los estándares del OGC. Ello ha posibilitado, la implementación de aplicaciones como MovilWeb destinada al seguimiento de vehículos sobre cartografía vectorial dentro de una arquitectura cliente–servidor. Esta herramienta permite el control de flota de manera remota sobre una red de comunicaciones, posibilitando reconstruir el comportamiento del vehículo en un determinado periodo de tiempo y analizando, parámetros como la velocidad

desarrollada, las detenciones realizadas y las salidas fuera de la ruta planificada (González-Suárez et al. 2011).

De igual manera, la Universidad de las Ciencias Informáticas (UCI), de conjunto con la empresa GEOCUBA, ha diseñado otra solución de SIG denominada GeneSIG. Esta plataforma tiene el objetivo de proporcionar servicios de acceso a la información geográfica, para su consulta, análisis y visualización mediante una interfaz de usuario sencilla y de fácil manejo. Además, permite utilizarlo como una aplicación SIG, a través de la cual los usuarios pueden consumir, manipular y consultar bases de datos cartográficas digitales, de diversos formatos y orígenes.

Para el caso de la agricultura cañera del país, se reporta como uno de los primeros trabajos relacionados con los SIG, el ordenamiento territorial de la provincia Villa Clara llevado a cabo a través del SIG *MapInfo v8.0* (Pitney Bowes Software Inc. 2008); donde se digitalizó el mapa de catastral a nivel de campo y de suelo, de las unidades de producción de la empresa azucarera provincial. Además, se expuso el potencial productivo de los suelos destinados al cultivo de la caña de azúcar (Becerras et al. 2008). Con la implementación de esta investigación se obtuvo una base cartográfica provincial de las áreas destinadas al cultivo de la caña de azúcar. Dicha información, vinculada con las bases de datos de los servicios agrícolas posibilitó la creación de mapas temáticos referentes al comportamiento varietal, el uso actual de los suelos, el comportamiento de los rendimientos cañeros, entre otros. De su análisis fue posible el trazado de una estrategia de aplicación de insumos que posibilitó enmendar los déficits de nutrientes de las parcelas. Posteriormente, este trabajo fue extrapolado a otras provincias, e incluso extendido a escala de país y sirvió de base a posteriores análisis de ubicación de los cultivos con el fin de realizar un manejo apropiado de los mismos (Benítez-Puig et al. 2018).

De forma general, los SIG destinados a la agricultura cañera implementados hasta el momento han dado paso en el establecimiento de las bases metodológicas de regionalización, zonificación y lotificación del cultivo de caña de azúcar; en la búsqueda de incrementar los rendimientos y realizar un manejo adecuado de las áreas cultivables. Sin embargo, la totalidad de los trabajos realizados hasta la fecha, se encuentran limitado al empleo de software propietario y el uso de ficheros locales como fuente de información.

Consecuentemente, el desarrollo de un SIG con la capacidad de reutilizar la información geográfica manipulada actualmente en las diversas empresas azucareras del país podría sentar las bases para la aplicación de técnicas avanzadas de cultivo basadas en el desarrollo de las maquinarias agrícolas, las técnicas de precepción remota y la automatización de procesos productivos como el riego.

1.5.1 Maquinarias Agrícolas de Avanzada

Los recientes avances de la electrónica, la hidráulica y los dispositivos empotrados han dotado a las maquinarias agrícolas de elevadas prestaciones que les han posibilitado incrementar su eficiencia operacional. Muestra de ello es el grado de automatismo que poseen los equipos distribuidos por fabricantes como *Case IH*, los cuales tienen presencia en nuestro país.

Las novedosas prestaciones incorporadas a las maquinarias agrícolas, han posibilitado la extracción de una gran cantidad de información del área cultivable y de la máquina en general; donde una de las principales utilidades de estos datos es, la confección de los llamados Mapas de Rendimiento (MR). Según (Albarenque and Veléz 2011), un MR (Figura 1.4) puede definirse como un modelo digital del lote conformado por un conjunto de puntos de mapeo registrados durante la cosecha. La cantidad de puntos de mapeo que posee un mapa de rendimiento varía según el tamaño del lote y ronda en un promedio de 22.000 puntos.

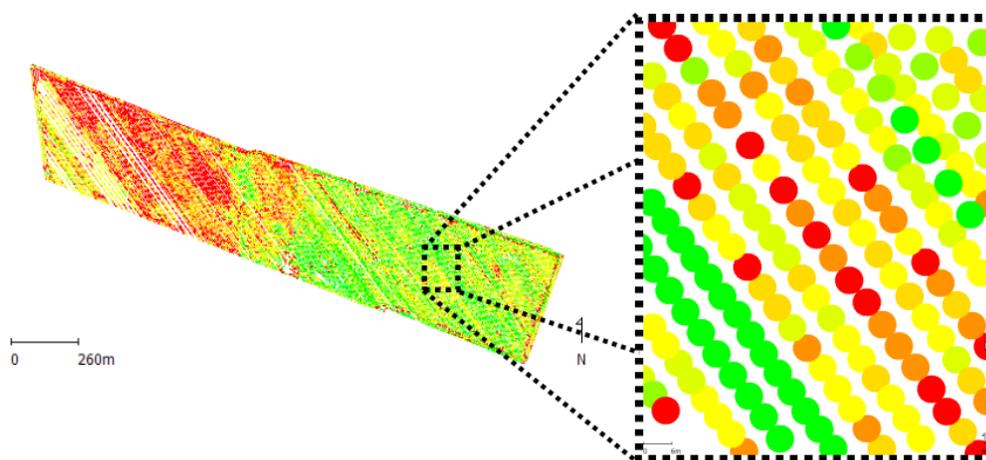


Figura 1.4 Mapa de Rendimiento

Los MR constituyen las entradas para el proceso de aplicación de Dosis Variable (DV) de los distintos químicos que necesita un cultivo (fertilizantes, herbicidas, fungicidas, etc.). Esta información es enriquecida a partir de los datos provistos por otras fuentes e importada a los dispositivos de control y monitoreo de las maquinarias agrícolas.

1.5.2 Percepción Remota

La percepción remota se ha convertido en una importante fuente de información en el manejo de la producción agrícola, no sólo a escalas locales sino a nivel global, particularmente para aquellas regiones en que el suministro de alimentos suele pasar por períodos críticos. En estas aplicaciones la percepción remota es particularmente empleada para la identificación de cultivos, así como su análisis fenotípico, jugando un papel primordial las características espectrales de los mismos.

En el caso de la agricultura cañera, el binomio tecnológico de los SIG y las imágenes aéreas posibilitan la creación de mapas digitales formados por diversas capas, como son: el tipo de suelo, la distribución de nutrientes, la topografía del terreno, la humedad del suelo y la cobertura vegetal. Todas estas informaciones constituyen la base para el empleo de nuevas técnicas de gestión de parcelas basadas en la variación intraparcularia de los cultivos (Palaniswami, Gopalasundaram, and Bhaskaran 2011).

La teledetección ha sido objeto de desarrollo por parte de diversas naciones en los últimos años. Muestra de ello lo constituye el establecimiento de agencias espaciales dedicadas a fomentar las aplicaciones pacíficas de la ciencia espacial, entre las que se puede referir: la Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio, el Centro Nacional de Estudios Espaciales y la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés).

Entre los proyectos de mayor renombre liderados por la ESA, se encuentra el Programa Copérnico para la Observación de la Tierra. Este no es más que una iniciativa europea enfocada a proveer libremente información relacionada con el monitoreo ambiental (Figura 1.5).

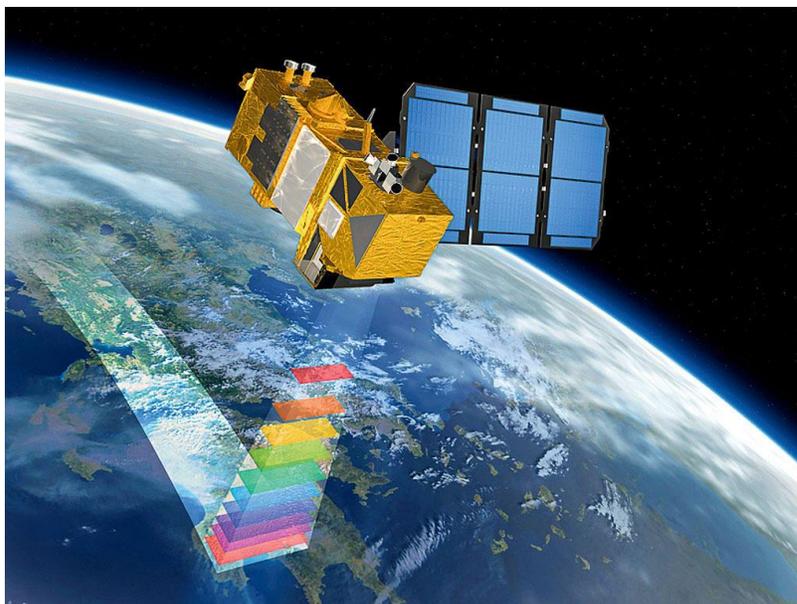


Figura 1.5 Imágenes Satelitales aplicadas a la agricultura

Existen diversos tipos de imágenes aéreas aplicadas a la agricultura, cada una de ellas varía considerablemente según su resolución espacial, temporal y espectral; la selección de una u otra depende de los objetivos del proyecto y de su aplicación. Es claro que la adquisición de imágenes de alta resolución espacial tiende a ser mucho más costosa, pero en los últimos años la presencia de varias empresas gubernamentales y privadas ha disminuido significativamente el precio de adquisición de imágenes continuas y de resolución adecuada para hacer seguimientos agrícolas (Murillo and Carbonell 2012).

Por su parte, el desarrollo de los VANT ha posibilitado diversificar las aplicaciones de los mismos, ya que pueden ser equipados con cámaras de elevadas prestaciones para ayudar con la exploración u otras actividades del campo. Dicho auge, se encuentra amparado por: el aumento de la calidad de las imágenes resultantes, debido al empleo de cámaras de alta resolución; la disminución del ruido ambiental, a causa del vuelo a baja altura; entre otros (Rincón-Romero et al., 2015). Algunas de las ventajas del empleo de plataformas VANT, frente a las satelitales son: el aumento de la producción, la posibilidad de escoger el momento oportuno de realizar la fotografía, la realización de trabajos en zonas de accesibilidad reducida y la capacidad de volar a poca altura posibilitando capturar imágenes con una gran resolución. Pese a todo, la aplicación de la fotogrametría en la agricultura se encuentra

limitada, a aplicaciones de investigación, debido a la baja autonomía de los VANT y la necesidad de emplear poderosos equipos de cómputo para la obtención de las ortofotos.

1.5.3 Máquinas de Riego

Con el fin de realizar un uso racional y eficiente de los recursos hidráulicos en las actividades agrícolas, las máquinas de riego han sido objeto de la incorporación de elementos de hardware capaces de controlar su régimen de trabajo y a su vez captar informaciones referentes al funcionamiento de las mismas (Hezarjaribi and Sourell 2008).

Los sistemas de riego por aspersión lineal, constituyen uno equipamientos más difundidos en la agricultura cañera. Su amplio empleo responde a las potencialidades de aplicar controladamente, cantidades uniforme de agua y productos químicos a toda la parcela. Pese a su eficiencia operacional, se ha hecho necesaria la modernización de sus equipamientos con el fin de satisfacer las necesidades reales de los cultivos, atendiendo a la variabilidad de los campos cultivados.

Las Máquinas de Riego de Pivote Central (MRPC), son particularmente susceptibles a los enfoques de tratamiento diferenciado del cultivo, debido a la posibilidad de incorporar elementos de automatización que controlen su velocidad de giro y el funcionamiento de sus boquillas. Ello ha permitido el desarrollo de investigaciones como (Faci et al. 2001; Maohua 2001; Sourell and Sommer 2002) donde, de forma general se ha convergido hacia la estandarización de Regímenes de Irrigación Variable (VRI, por sus siglas en inglés). Esta tecnología consiste en: el empleo de válvulas aspersoras con la capacidad de abrirse y cerrarse en función de una señal de control; un sistema de posicionamiento para ubicar la posición de la máquina dentro del campo y una unidad de procesamiento capaz de cargar la planificación de tarea de riego. Dicha unidad tiene, además, la funcionalidad de enviar información referente al cumplimiento de la tarea y el estado técnico de la máquina; donde estos datos son visualizados, generalmente a partir de portales web (Figura 1.6).

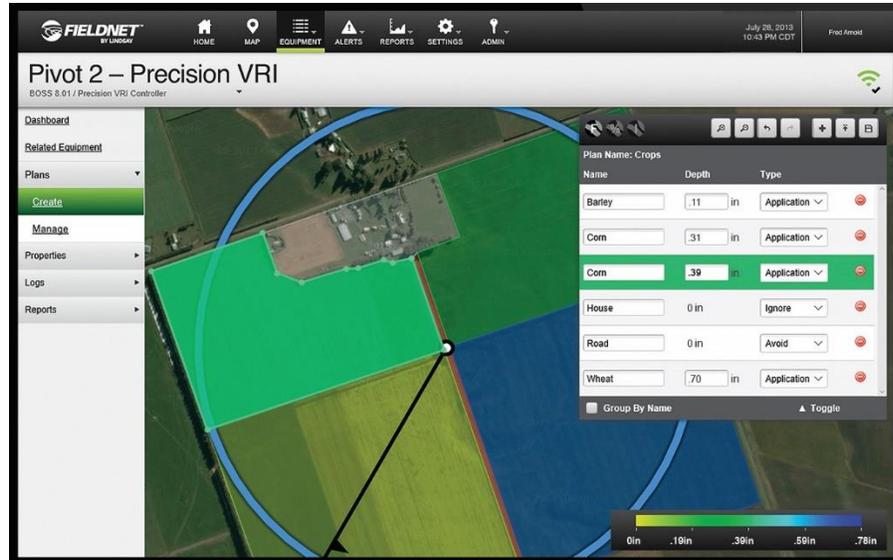


Figura 1.6 Diagrama de muestra de una zona de manejo del riego en una parcela con *VRI*

Para el caso de la agricultura cañera cubana, en investigaciones como (Avello-Fernández et al. 2018) se realiza la incorporación, a estas máquinas, de un Autómata Programable con el fin de controlar su funcionamiento a partir de información suministrada por el usuario. Con la actualización de su equipamiento, las MRPC tienen la capacidad, además, de registrar una serie de parámetros de elevada importancia como son: el tiempo de trabajo, la cantidad de agua aplicada, el ángulo de rodada, entre otros. Todos estos parámetros pueden ser exportados en forma de un fichero de registro, a través de servicios web sustentado por el hardware de control adosado a la máquina.

La supervisión y el control remoto de las MRPC da paso, a su vez, al empleo de otras fuentes de información como las imágenes aéreas y los servicios meteorológicos con el fin de realizar de formas más efectiva las actividades de riego.

1.6 Consideraciones finales del capítulo

El uso de Sistemas de Información Geográfica en ramas como la agricultura, posibilita analizar, administrar y mostrar todas las formas de información geográficamente referenciadas y da paso al establecimiento de técnicas de agricultura avanzada.

Para el desarrollo de un Sistema de Información Geográfica con la capacidad de gestionar la información geoespacial relacionadas con las prácticas agronómicas de avanzada, es preciso la articulación de un software de procesamiento, un gestor de bases de datos y un geoportal.

La utilización de los servicios web de mapas, facilita la obtención de información espacial actualizada, necesaria para la aplicación de técnicas avanzadas de cultivo.

A pesar del desarrollo que tiene nuestro país en materia de Sistemas de Información Geográfica en algunos sectores, es palpable que en la agricultura estos resultan deficientes para gestionar la información relacionada con las prácticas agronómicas de avanzada.

Existe en nuestro país maquinarias agrícolas del Sistema Avanzado de Cultivo, Sistemas de Riego Automatizados, así como experiencia de aplicación de técnicas de percepción remota que hacen posible la introducción de prácticas agronómicas que ofrecen potencialidades para incrementar los rendimientos productivos del cultivo de la caña de azúcar.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se lleva a cabo el diseño la plataforma del SIG sobre la base de las diferentes tecnologías analizadas hasta el momento, empleando el software QGIS como herramienta principal de procesamiento y gestión de los datos geoespaciales; el SGBD PostgreSQL con su complemento PostGIS para garantizar el almacenamiento y difusión de la información geográfica y por último, el *OpenGeo Suite* como plataforma de desarrollo web para garantizar el acceso al SIG diseñado a partir de los servicios de internet. Primeramente, se realiza un análisis del flujo de la información geoespacial en la plataforma confeccionada. Posteriormente, se analizan detalladamente los diferentes programas computacionales que componen el sistema, así como sus interfaces de comunicación. Por último, se presentan los diferentes procesos y tecnologías que sirven de fuente de información para la aplicación de prácticas de agricultura avanzada en el cultivo de la caña de azúcar en nuestro país.

2.1 Arquitectura del sistema

De acuerdo con el estado actual de las tecnologías de los SIG y los software que complementan su funcionamiento se propone el desarrollo de una plataforma capaz de almacenar los registros de operación de las maquinarias agrícolas durante sus operaciones en el campo. Por lo tanto, dicho sistema debe manejar varios formatos de datos e intercambiar información con los servicios computacionales disponibles como: son las imágenes aéreas y la percepción remota; con el fin de sustentar las prácticas agronómicas de avanzada en la cosecha de la caña de azúcar en Cuba. Conforme a lo anteriormente descrito, se propone una plataforma con la estructura mostrada en la Figura 2.1.

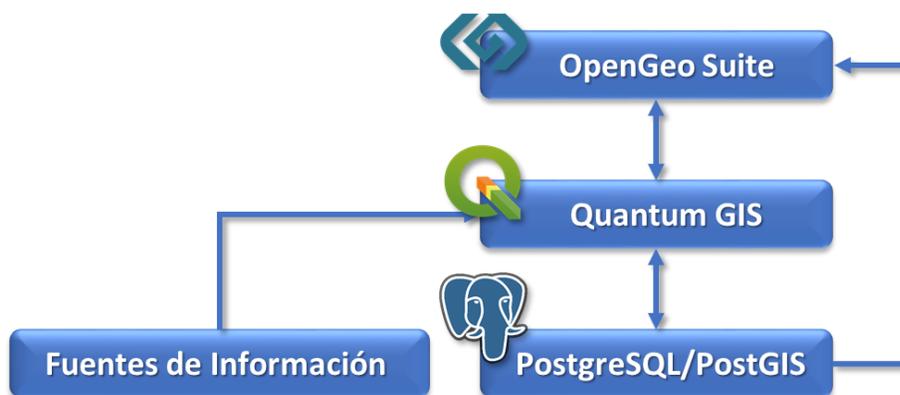


Figura 2.1. Estructura general del SIG propuesto

La inspección visual de la figura anteriormente mostrada, nos permite apreciar el flujo de la información geoespacial, el cual comienza con cargar la información base al software QGIS donde tiene lugar el procesamiento de la misma. La información resultante podrá ser almacenada directamente en la base de datos geoespacial para su difusión o consumida desde la plataforma *OpenGeo* en caso de ser un análisis puntual que no merezca su almacenamiento.

2.2 PostgreSQL

Las bases de datos en un SIG otorgan a la información geoespacial mayor independencia, disponibilidad, protección, eficiencia en la captura, codificación de los datos y sobre todo, se resalta la organización de la información geoespacial y la conectividad con distintas aplicaciones (Olaya 2014). A su vez, la conectividad de las bases de datos a un SIG permite administrar la información geoespacial eficientemente ya que, en grandes volúmenes de datos, los geoprocursos y las consultas se pueden realizar en menor tiempo, mayor facilidad y sencillez de acceso.

PostgreSQL es un SGBD relacional de código abierto orientado a objeto que posibilita la confección ilimitada de bases de datos y proporciona gran escalabilidad ante grandes cargas de trabajo (Silberschatz, Korth, and Sudarshan 2006). PostGIS, figura entre sus módulos más empleados, el cual permite la manipulación y almacenamiento de datos espaciales. La inserción de este complemento al SGBD, se realiza a partir de la encuesta SQL mostrada en la Figura 2.2.

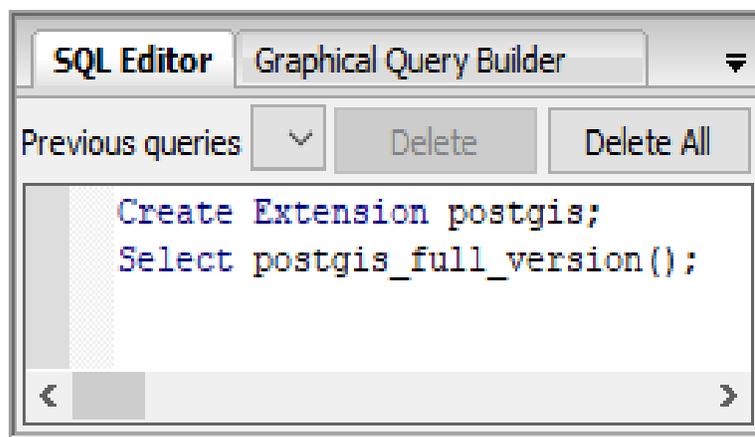


Figura 2.2 Creación de la extensión PostGIS

Con el empleo de PostGIS como plantilla para las bases datos geoespaciales creadas, se le añaden prestaciones como la concatenación de cadenas, la realización de operaciones matemáticas y la extracción de información temática. Además, integra funciones para el análisis de componentes geométricos, la determinación de las relaciones espaciales y la manipulación de geometrías. Estas funciones espaciales sirven como piedra angular de cualquier proyecto espacial y se pueden agrupar en cinco categorías:

- Conversión de unas geometrías en otras.
- Gestión de la información acerca de las tablas espaciales.
- Recuperación de las propiedades y medidas de una geometría.
- Comparación de geometrías con respecto a su relación espacial.
- Generación de nuevas geometrías a partir de otras.

El empleo de PostgreSQL con su complemento PostGIS, posibilita además la diversificación de la información geoespacial a partir de la configuración de acceso a otros sistemas de gestión como los geoportales.

2.3 Quantum GIS

Creado en 2002 por Gary Sherman, QGIS figura entre los SIG de código abierto más empleados por los usuarios de las tecnologías de la geomática en general. Disponible para diversos sistemas operativos, posibilita el manejo de una gran variedad de ficheros.

QGIS posee una arquitectura extensible, basada en la incorporación de complementos desarrollados tanto en *C++* como en *Python*, que permiten dar soporte a nuevas fuentes de datos para ampliar la funcionalidad del programa principal de manera modular. En base a estas prestaciones es posible sintetizar procedimientos o adecuar herramientas del software a las necesidades de la aplicación.

Desde sus inicios, QGIS ha atraído continuamente a gran cantidad de desarrolladores y usuarios de todo el mundo, lo que a su vez ha inducido una constante evolución de su código fuente y por tanto sus prestaciones. La estructura general puede entenderse como un conjunto de capas de abstracción, donde la más baja es el acceso a la fuente de datos. Para el caso de los ficheros vectoriales, esta capa tiene la responsabilidad de leer las características nativas y convertirlas a instancias de la clase de entidad QGIS. En cambio, para el caso de los archivos ráster, dicha capa oculta la complejidad de las fuentes de datos individuales al convertir las imágenes en elementos del mapa. Las capas superiores, son el resultado de la ejecución de los diferentes geoalgoritmos que brinda el software a partir de su interfaz gráfica de usuario.

2.3.1 Análisis Vectorial

Entre las características fundamentales que han hecho de QGIS uno de los SIG más utilizados internacionalmente, se encuentra la visualización de la información temática de las capas a partir de una tabla de atributos. Sobre esta se realizan las rutinas de selección de entidades, edición de valores, búsqueda de características, entre otras. La principal interfaz para llevar a cabo estas funcionalidades, es denominada Calculadora de Campo (Figura 2.3); la cual permite, a través de cálculos básicos o funciones definidas, modificar la información contenida en los campos de la capa seleccionada.

Las diferentes funciones definidas en la Calculadora de Campo, se encuentran estructurada según su aplicación, teniéndose así las funciones: condicionales, matemáticas, operacionales y geométricas. Esta última engloba un conjunto de operaciones básicas como son el cálculo del área, del perímetro, de los vértices de las figuras, entre otras.

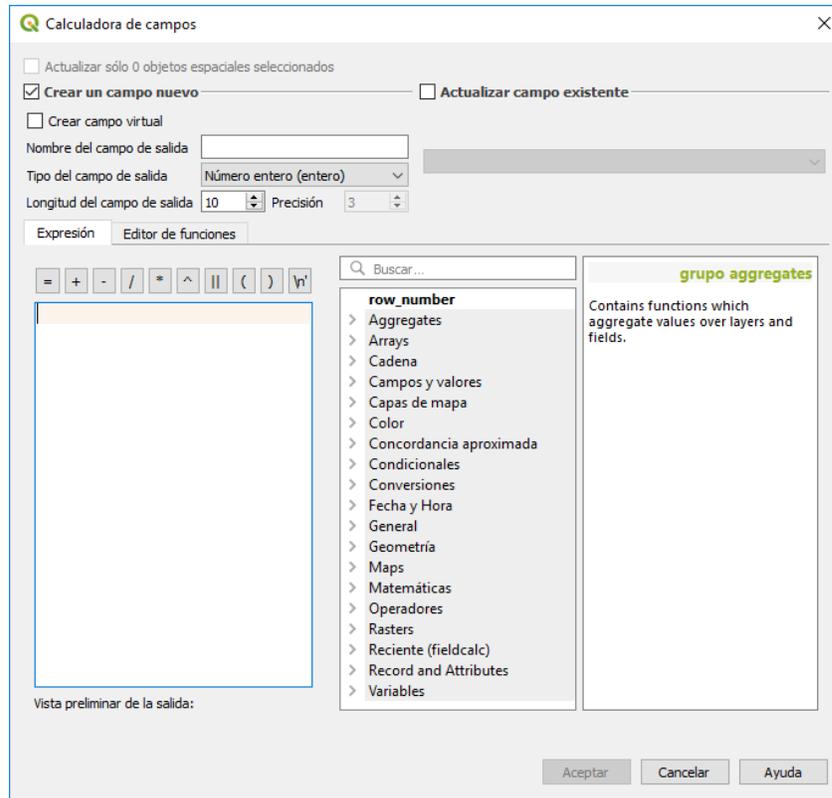


Figura 2.3 Calculadora de Campos

El resultado de las operaciones realizadas con esta interfaz, puede ser actualizado en un campo existente o salvado en uno nuevo. Para esta última opción, es preciso definir, a través de la misma ventana, el nombre del nuevo campo, el tipo de valor de salida y sus dimensiones.

2.3.2 Análisis Ráster

Por su parte, para el tratamiento de los valores absolutos presentes en los píxeles de los ficheros ráster, QGIS posee la interfaz denominada Calculadora Ráster (Figura 2.4). Esta herramienta, carga automáticamente las diferentes bandas que componen los ficheros ráster presentes en el espacio de trabajo y brinda la posibilidad de combinarlos, a partir de diversos operadores lógicos y matemáticos.

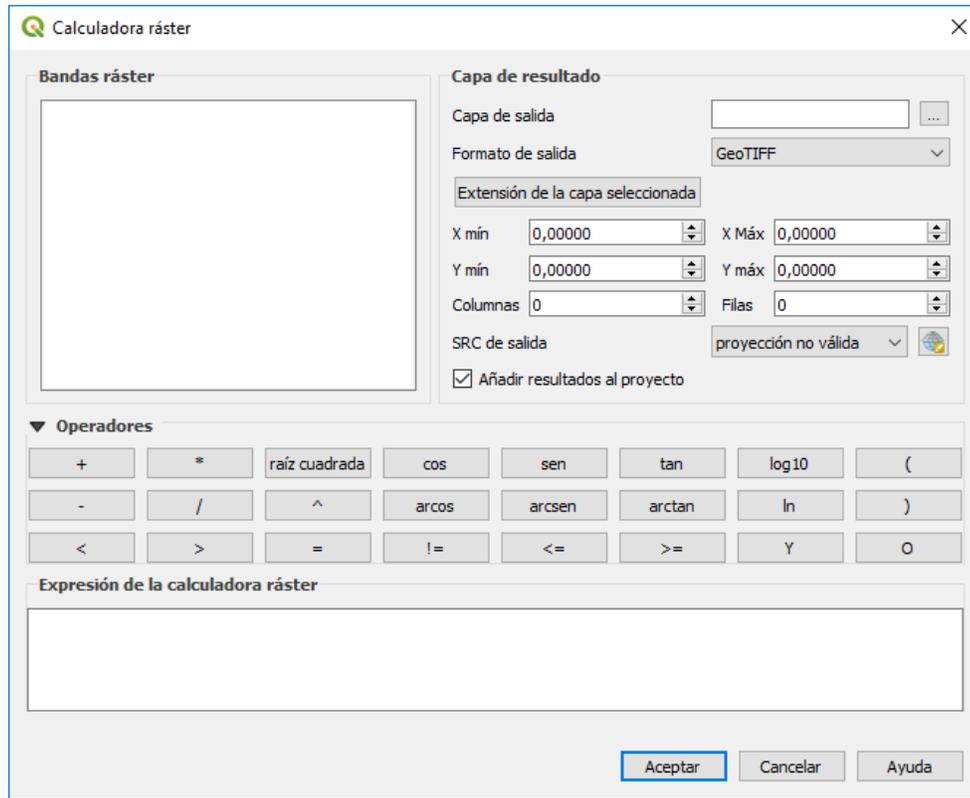


Figura 2.4 Calculadora Ráster

El resultado de la operación definida, es almacenado como una nueva capa de salida en el espacio de trabajo. Para ello, la propia interfaz proporciona las herramientas para definir la extensión del área calculada, la resolución de la imagen, así como el sistema de coordenadas de salida.

2.3.3 Conversión de ráster a vectorial

Para la interpretación de los mapas elaborados a partir de índices vegetativos, por parte de las maquinarias AFS, requieren la conversión de la estructura del fichero ráster a vectorial. Con este objetivo, se emplea la herramienta *Raster values to point*, heredada del software SAGA. A partir de la ventana mostrada en la Figura 2.5, se carga el fichero ráster presente en el espacio de trabajo y se selecciona el tipo de polígono a utilizar como base.

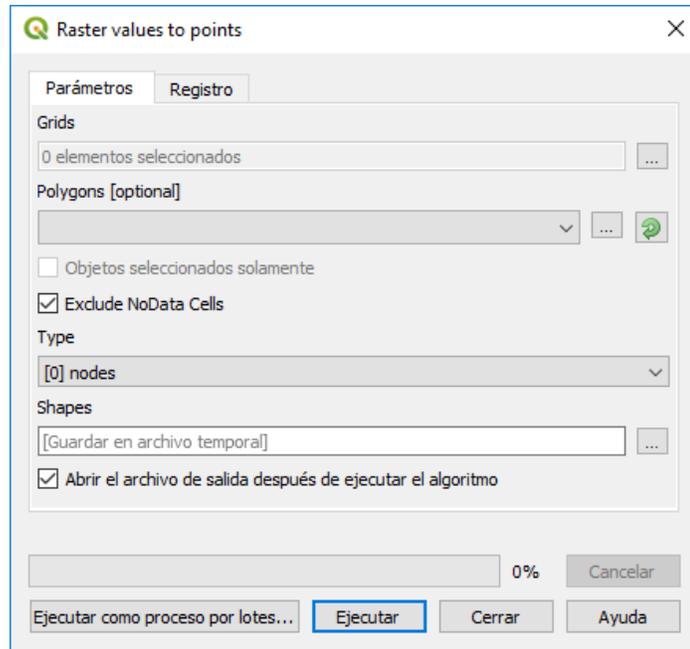


Figura 2.5 Conversión de imagen ráster a vectorial

El resultado de este procesamiento consiste en la conversión de un fichero ráster, generalmente de extensión *GeoTIFF* a uno vectorial *shp* de ESRI. Este último lo compone un conjunto de archivos separados que tienen el mismo nombre y cada uno con diferentes extensiones:

- SHP: Contiene los puntos o vértices de los elementos geográficos que definen la geometría.
- DBF: Posee la tabla de atributos o descripciones que tiene cada uno de los elementos.
- SHX: Tiene el índice geoespacial para facilitar las búsquedas entre los archivos.
- PRJ: Contiene la definición del sistema de coordenadas, proyección cartográfica y unidades que usa el fichero ráster para registrar los elementos geográficos.
- XML: Engloba metadatos (descripción de los geodatos) en un formato estandarizado.

El fichero resultante es introducido al monitor de rendimiento de la maquinaria agrícola como base para la realización del tratamiento diferenciado de las áreas cultivable, lo cual es conocido como mapa de prescripción. A su vez, es posible almacenar dicho mapa para ser difundidos por los servicios web y reutilizado en sucesivas operaciones.

2.3.4 Conexión con servicios web de mapas

De manera similar, para acceder a los datos de los WMS, QGIS dispone de la interfaz mostrada en la Figura 2.6. A partir de esta, se introduce el nombre identificativo, la URL y el usuario y contraseña del servicio solicitado. Un servidor WMS actúa sobre las peticiones por parte del cliente para un mapa ráster con una extensión dada, el conjunto de capas, el estilo de simbolización y la transparencia. El servidor WMS consulta sus fuentes de datos locales, rasteriza el mapa y lo envía de vuelta al cliente en formato ráster. Para QGIS, este formato sería típicamente JPEG o PNG.

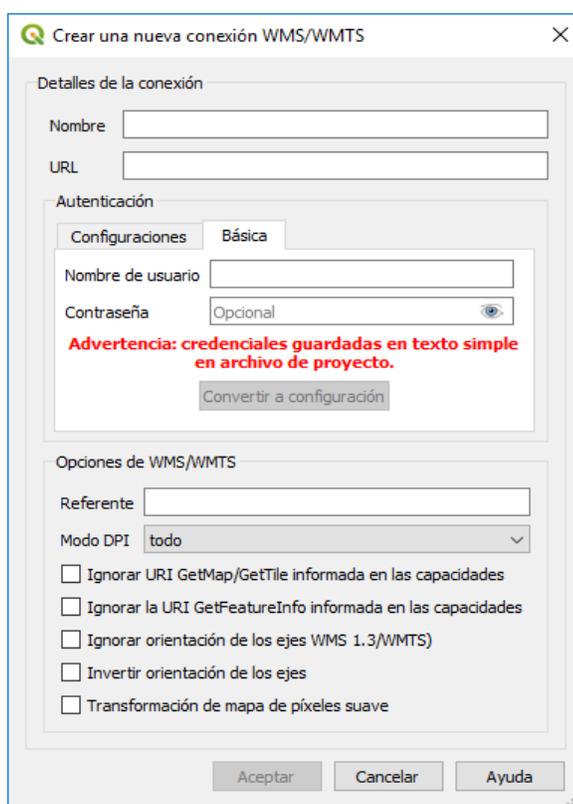


Figura 2.6 Crear conexión WMS

La petición *GetCapabilities* se utiliza para recuperar las capacidades del servicio WMS. Las respuestas de esta petición serán almacenadas durante 24 horas siempre que la misma no vuelva a realizarse. Para extender su período de almacenamiento, se emplea las conexiones a bases de datos.

2.3.5 Conexión con base de datos

El desarrollo de las tecnologías relacionadas con los SIG en los últimos años, ha permitido aumentar de la información geoespacial de diferentes procesos. Por tanto, se ha hecho necesario el desarrollo de herramientas de codificación y almacenamiento de la información geográfica con el fin de lograr una usabilidad adecuada de los SIG. En este sentido, para la conexión con las bases de datos, se emplea la interfaz mostrada en la Figura 2.7.

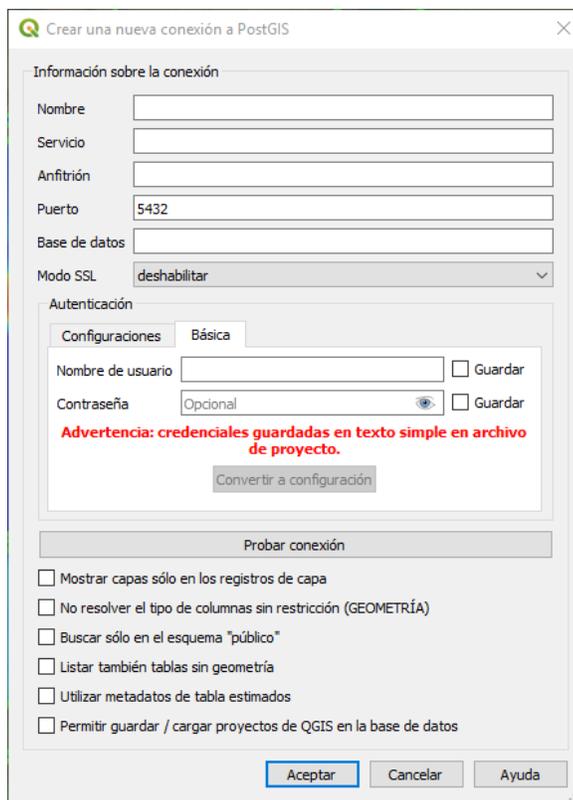


Figura 2.7 Crear conexión a PostgreSQL

Para la configuración de esta conexión, se hace necesario rellenar los campos referentes a: el nombre de la conexión, la dirección del servidor, el nombre de la base de datos, el nombre de usuarios y la contraseña. Todas estas informaciones serán provistas por la parametrización seleccionada en el SGBD utilizado.

2.4 OpenGeo Suite

Las tecnologías web poseen una significación preponderante por el papel que está jugando el internet en el mundo moderno. Es por ello que la integración de los SIG de escritorio con

aplicaciones basada en entorno web, constituye un aspecto imprescindible para que usuarios con menos conocimientos de geomática puedan acceder a la información geográfica de su interés.

OpenGeo Suite es una plataforma de desarrollo de aplicaciones geoespaciales web que permiten servir mapas y datos a través de los navegadores de dispositivos móviles y clientes de escritorio (Morales 2017). Entre las aplicaciones que la integran se encuentran:

- *GeoServer*: Constituye el servidor de mapas que provee acceso a fuentes de datos y mapas cartográficos mediante estándares web.
- *GeoWebCache*: Almacena los mapas teselados y los sirve a través de protocolos estándar para garantizar la escalabilidad de los geoservicios.
- *OpenLayer*: Es el estándar para los clientes cartográficos web, capaz de consumir múltiples fuentes de mapas y de proveer herramientas para la edición y captura de datos.
- *GeoExplorer*: Es el componente estándar de interfaz de usuario encargada de consultar la base de datos y presentar a los usuarios finales la información solicitada con la apariencia y funcionalidad de las aplicaciones de escritorio.

El acceso web a la plataforma, puede ser regido por nombre de usuario y contraseña atendiendo a los diferentes roles administrativos de los usuarios que interactúen con el mismo. Con este fin, el administrador del sistema a través del servidor de mapas *GeoServer*, controla el acceso a la interfaz web por parte de los diferentes usuarios, así como configura el acceso a las bases de datos geoespaciales y demás servicios.

Para el caso de la base de datos, *GeoServer* posee la interfaz mostrada en la Figura 2.8 desde la que se introducen los parámetros de conexión del servicio que se quiera conectar (servidor, puerto, nombre de la base datos, usuario y contraseña).

Identificado como admin. Cerrar sesión

Nuevo origen de datos vectoriales

Agregar un nuevo origen de datos vectoriales

PostGIS
PostGIS Database

Información básica del almacén

Espacio de trabajo *

opengeo

Nombre del origen de datos *

Descripción

Habilitado

Parámetros de conexión

host *

localhost

port *

5432

database

schema

public

user *

passwd

Espacio de nombres *

http://lopengeo.org

Figura 2.8 Conexión con base de datos PostgreSQL

El acceso a las diferentes bases de datos permite publicar las tablas geoespaciales como capas de información; las cuales pueden ser difundidas a través de la web con la herramienta *GeoExplorer*. A su vez, su publicación, genera una URL de acuerdo con el estándar WMS que posibilita consumir la información geográfica directamente en el software de gestión de datos, manteniendo la estructura seleccionada.

Para el caso del acceso a las imágenes, el guardado de las mismas en una base de datos geoespacial, presupone la conversión del fichero ráster en su equivalente SQL; lo cual requiere equipos de cómputo de elevadas prestaciones y a su vez se duplica el tamaño de almacenamiento del archivo. Atendiendo al gran tamaño de las imágenes aéreas en sí, la visualización de estas se realiza directamente desde un directorio local del fichero; para ello, *OpenGeo* provee la interfaz de la Figura 2.9, donde se introduce un identificador de la conexión y se localiza el archivo en el disco duro de origen.



Editar un origen de datos raster

Descripción

GeoTIFF
Tagged Image File Format with Geographic information

Información básica del almacén

Espacio de trabajo *

opengeo ▾

Nombre del origen de datos *

mapa

Descripción

Habilitado

Parámetros de conexión

URI *

file:///C:/OSGeo4W64/Sentinel-2 L1C from 2018-12-02. Buscar...

Guardar Cancelar

Figura 2.9 Configuración de acceso a ficheros ráster

La publicación de los mapas ráster en *OpenGeo*, se encuentra contralada a partir de la herramienta *GeoWebCache*. Esta, fracciona imagen a presentar en forma de mosaicos contiguos que se generan en función de la demanda de visualización; ello posibilita optimizar la manipulación de estas imágenes gran tamaño, ya que no se tienen que componer en todo momento.

2.5 Imágenes aéreas

Las imágenes aéreas constituyen una vasta fuente de información para la determinación, de forma indirecta, de importantes parámetros en las extensas áreas cultivables. Entre los resultados de mayor importancia del procesamiento de este tipo de imágenes, se encuentra el cálculo de índices vegetativos; los cuales son calculados a partir de dos fuentes de información, fundamentalmente: la fotogrametría aérea basada en VANT y las imágenes satelitales.

2.5.1 Fotogrametría Aérea

A partir de la experiencia transmitida por la empresa USENSE en el marco de la cooperación con el Consejo Interuniversitario Flamenco VLIR, el Grupo de Automatización Robótica y Percepción (GARP) de la UCLV ha desarrollado capacidades para manufacturar, mantener y reparar varios modelos de VANT. Actualmente tiene en operación las aeronaves X8-GARP 01 y 3DR RTF X8+ (Figura 2.10); con esta tecnología es posible la adquisición de las imágenes siguiendo un sistema para la planificación de los vuelos a partir de las posibilidades de la aeronave y las necesidades de la aplicación. La cámara multispectral empleada es la Parrot Sequoia, un equipo que pesa solo 107 gramos y es muy potente y compacto. Tiene cuatro filtros para analizar nutrientes y biomasa de los cultivos y cuenta con una lente RGB de 16 mpx, que permite generar mapas con alto detalle. Posee además un sensor que capta la luz incidente, útil para guardar las condiciones de iluminación y calibrar los cuatro sensores multispectrales, gracias al cual se pueden obtener índices de vegetación precisos (Kharuf-Gutierrez et al. 2018).



Figura 2.10 Fotogrametría aérea basada e VANT

Las imágenes resultantes de los procesamientos realizados, manipulados como un fichero ráster convencional, son difundidas a partir de las potencialidades de *OpenGeo Suite*, con el fin de analizar por parte de los especialistas la respuesta espectral de los cultivos. Pese a la excelente calidad de las imágenes obtenidas a partir de la fotogrametría basada en VANT, su uso a gran escala se encuentra limitado por la baja autonomía de los vehículos la demora

revestida para la confección de los ortomosaicos. En este sentido, para la obtención a gran escala de información visual de los cultivos, se emplean las imágenes provistas por servicios satelitales.

2.5.2 Imágenes Satelitales

Sentinel-2 (S2), figura entre las misiones espaciales de Copérnico más diversificadas en las aplicaciones agrícolas. Basada en la constelación de dos satélites distribuyen, gratuitamente, imágenes con alta resolución espacial, temporal, espectral y radiométrica. Estas características posibilitan la generación de mapas de usos del suelo, cobertura vegetal, contenido de clorofila, contenido de agua en las hojas, entre otros (Borràs et al. 2017). Todo ello respaldado con un sensor de imagen multiespectral (MSI, por sus siglas en inglés) a bordo del S2, que proporciona 13 bandas espectrales; las cuales van desde el espectro visible y el infrarrojo cercano, hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR, por sus siglas en inglés) tal como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Bandas espectrales provistas por Sentinel-2

Número de Banda	Resolución (m/pixel)	Longitud de Onda Central (nm)	Ancho de Banda (nm)	Aplicaciones
1	60	443	20	Detección de aerosol
2	10	490	65	Detección de color azul
3	10	560	35	Detección de color verde
4	10	665	30	Detección de color rojo
5	20	705	15	Clasificación de Vegetación
6	20	740	15	Clasificación de Vegetación
7	20	783	20	Clasificación de Vegetación
8	10	842	115	Detección de NIR
8A	20	865	20	Clasificación de Vegetación
9	60	945	20	Detección de vapor de agua
10	60	1380	30	Discriminación de nubes
11	20	1610	90	Discriminación de hielo
12	20	2190	180	Discriminación de nieve

S2 es un sistema compuesto por dos segmentos: el segmento espacial integrado por los satélites y el segmento en tierra. Este último es el encargado de la adquisición, procesamiento, clasificación y almacenamiento de los datos enviados por el segmento espacial, así como el control de la misión.

Con un período de revista de cinco días, S2 provee aproximadamente 1.6TBytes de información referente a 290 km de la superficie terrestre. Esta información es adquirida por el segmento en tierra, quien es además el encargado de procesarla, clasificarla, almacenarla para finalmente presentárselas a los usuarios finales. La calidad de las imágenes resultante de S2, está sustentada en la aplicación de estrictas correcciones radiométricas y geométricas calculadas en base a las características propias del instrumento y la plataforma en general (Drusch et al. 2012).

Para la adquisición de las imágenes, la ESA posee un portal de acceso gratuito, el cual además posibilita la realización de un procesamiento previo de la información con el fin de reducir la reflectancia atmosférica de fondo, el ruido inducido por las nubes, entre otros. Además, dicha interfaz, posibilita la configuración de servicios web de mapas para su uso directamente en los SIG. Ello permite descargar solamente el área requerida para el trabajo y utilizar las potencialidades de corrección atmosféricas provista por el propia ESA. Como consecuencia, se reduce el volumen de información a descargar y se obtiene una imagen de mayor calidad que posibilita la obtención de información multiespectral fiable correspondiente a las áreas cultivables.

2.5.3 Índices vegetativos

La detección de las necesidades hidráulicas de los cultivos constituye una de las aplicaciones más difundidas de los índices vegetativos en el cultivo de la caña de azúcar. Esta posibilita contrarrestar la limitación del desarrollo de la gramínea basándose en la aplicación oportuna y exacta de la cantidad de agua necesaria a partir de la información espectral del cultivo. El empleo de estas tecnologías en el riego de precisión es evidenciado en el trabajo presentado (Palacios-Vélez, Palacios-Sánchez, and Palacios-Sánchez 2011), donde se emplea el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) para el cálculo del Coeficiente del Cultivo (kc), según lo propuesto por (Cuesta et al. 2005) cuya fórmula para la estimación es:

$$kc = 1.15 \times NDVI + 0.17 \quad (2.1)$$

En base a ello es posible la obtención de una kc representativa de las características reales del cultivo; lo que evita el empleo de valores estimados de la misma y hace más efectivo el cálculo de las necesidades hídricas de las plantas. Esto garantiza a su vez, el acierto de las tomas de decisiones referentes en el manejo del riego y por consiguiente el aumento de la productividad.

Pese a ser el NDVI uno de los índices más utilizados, presenta como deficiencia una dependencia de la hora del día en que se toman las imágenes; debido a que no corrige los cambios en el ángulo de incidencia solar y por tanto produce resultados muy diferentes a lo largo del día. Todo ello ha generado un amplio interés en desarrollar otros índices que reduzcan este efecto. En ese sentido (Verstraete and Pinty 1996), desarrollaron el Índice de Vegetación Mejorado (EVI, por sus siglas en inglés) con el objetivo de optimizar la sensibilidad a la banda *nir*, lo que le permite diferenciar mejor las variaciones estructurales de la cobertura vegetal. Esto posibilita un mejor monitoreo de la vegetación mediante un desacoplamiento de la señal emanada por el suelo y una reducción de las influencias de la atmósfera.

La aplicación de EVI se extiende a una amplia variedad de estudios, entre los que se encuentran: los de cambio de cobertura terrestre, la estimación de parámetros biofísicos de vegetación, la fenología, la biodiversidad y la estimación de la producción primaria bruta. En trabajos previos realizados (Berardocco, Hartmann, and Hibert 2004; Inoue, Morinaga, and Tomita 2000; Xavier et al. 2004) se plantea la relación del Índice de Área Foliar (LAI, por sus siglas en inglés) con el EVI y se concluye que el índice calculado a partir de la ecuación (2.2) proporciona mejores resultados que la obtención simulada del mismo.

$$LAI = 0.0407 \times 10^{7.0345 \times EVI} \quad (2.2)$$

Los diferentes índices calculados, posibilitan la confección de mapas de prescripción, los cuales son la base para la aplicación de técnicas avanzadas de cultivo a partir de las maquinarias agrícolas AFS.

2.6 Datos de cosecha

Los datos de cosecha exportados por las maquinarias AFS, representan la principal fuente de información geográfica para el monitoreo de las operaciones agrícolas y la máquina en general. Estos, son el resultado de las mediciones realizadas por los diferentes sensores de la máquina, los que a su vez son georreferenciados por el receptor de posicionamiento y exportados a través del computador de abordo (Perez-Garcia et al. 2018).

La Empresa Azucarera Cubana ha dado pasos de avance encaminados a la modernización de su parque de maquinarias agrícolas con la inserción de cosechadoras y pulverizadoras de la firma *Case IH* (Figura 2.11). Todo ello con el fin de introducir transformaciones en las tareas relacionadas con la cosecha de la gramínea, que le permitan aumentar la eficiencia productiva de forma sostenible (Daquinta-Gradaille et al. 2018).



Figura 2.11 Maquinarias *Case IH* pertenecientes a AZCUBA Cosechadora A8000 (izquierda) y Pulverizadora Patriot 250 (derecha)

Estas máquinas poseen un novedoso sistema automatizado compuesto por: receptores de posicionamiento, sensores inteligentes, módulos de control de máquina y como principal interfaz hombre máquina un computador de abordo o monitor de rendimiento, como también es conocido.

El AFS Pro 700 (Figura 2.12), presente en las máquinas de la firma Case IH, es el resultado de la evolución de otros monitores previamente empleados por los fabricantes de esta transnacional. El monitor está formado por una pantalla táctil de 10.4 pulgadas y varios conectores a través de los cuales se permite la aplicación del sistema avanzado de cultivo. Así, se tienen el de cable coaxial, que posibilita la instalación de una video cámara para

facilitar las aplicaciones en el modo autopiloto; el Ethernet, que hasta la fecha no se le ha asignado utilidad; el DB-9, para la conexión de un módem externo que garanticen conectividad en tiempo real; un conector de 26 pines, para la alimentación del monitor y un conector de USB, que permite la inserción de un dispositivo de almacenamiento masivo hacia donde será salvada la información del funcionamiento de la máquina.

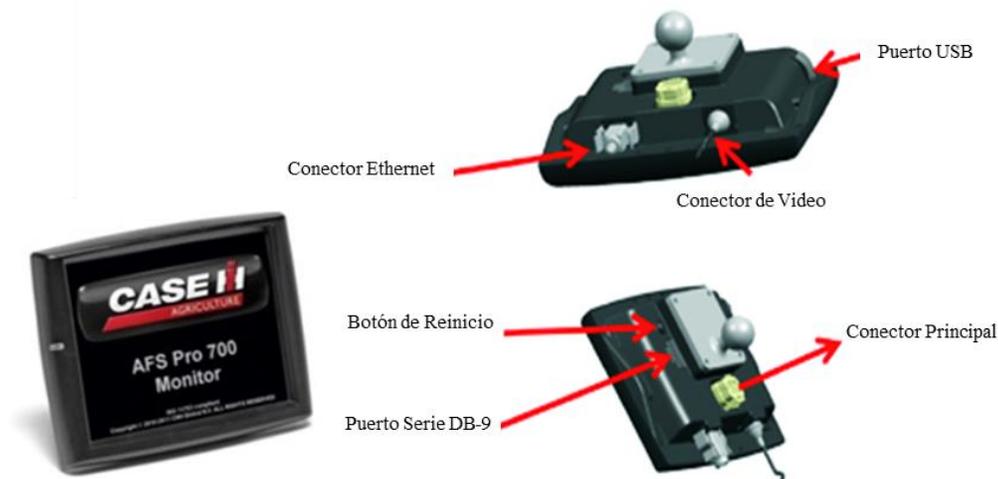


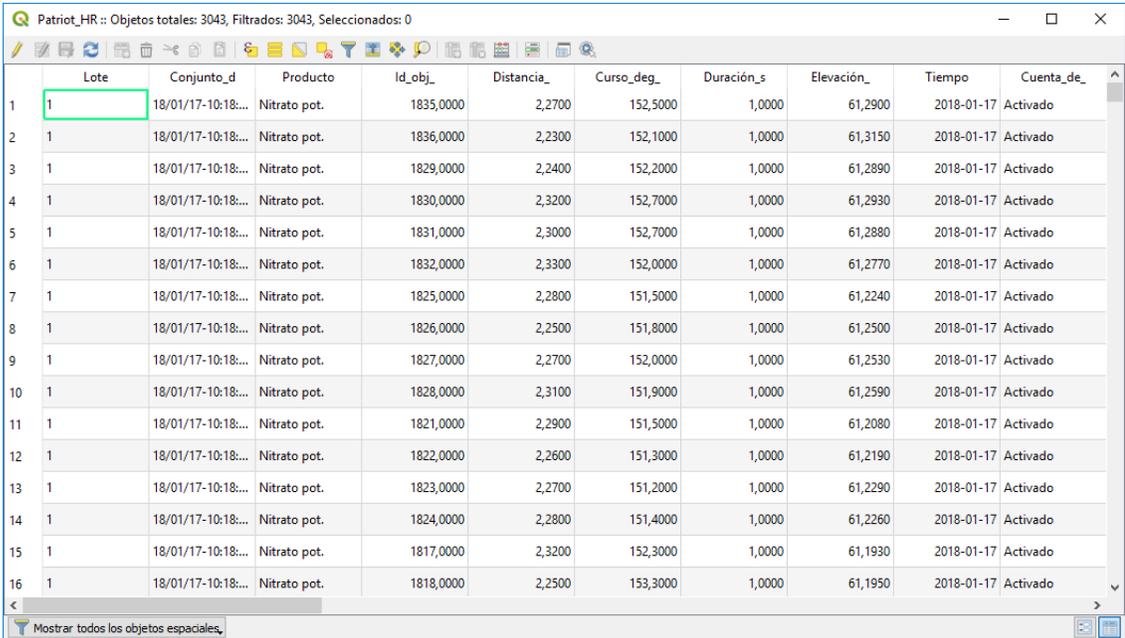
Figura 2.12 Monitor de rendimiento AFS Pro 700

Este sistema proporciona un cúmulo de información (ver Anexo I) que, hasta la fecha, no ha sido empleado a fondo por el personal de las empresas azucareras. Los datos de cosecha están formados por un fichero vectorial compuesto por un mapa de puntos representativo de la trayectoria realizada por la maquinaria, según la división administrativa de la zona de labranza. La integración de esta información en programas computacionales especializados, posibilita la parametrización de las operaciones agrícolas como son: el establecimiento de líneas de guías, la delimitación de terrenos, la identificación de obstáculos, entre otros.

Específicamente, para el caso de las pulverizadoras cañeras, el desarrollo tecnológico de las TIC de conjunto con la expansión de las técnicas de teledetección ha posibilitado considerar la variabilidad intraparcularia en las actividades agrícolas. Esto ha dado paso a la aplicación de Tecnologías de Dosis Variable (VRT, por sus siglas en inglés), con el fin de modificar la dosis de aplicación del producto a partir de un patrón previamente establecido llamado “mapa de prescripción”. Dicho patrón, es calculado con anterioridad e introducido en el dispositivo de control de la máquina en forma de archivo digital. Una vez concluida las actividades

agrícolas, los datos de cosecha exportados, analizados en los software de gestión permiten comprobar la efectividad de la labor realizada.

Para el análisis exhaustivo de los datos de cosecha, QGIS posee la interfaz denominada Tabla de Atributos (Figura 2.13), la cual separa por columnas las diferentes características del fichero procesado. Por su parte las filas, se corresponden con cada uno de los puntos registrados por el sistema automatizado del vehículo.



The screenshot shows the QGIS Attribute Table window for a layer named 'Patriot_HR'. The window title is 'Patriot_HR :: Objetos totales: 3043, Filtrados: 3043, Seleccionados: 0'. The table contains 16 rows of data, each representing a harvest point. The columns are: Lote, Conjunto_d, Producto, Id_obj_, Distancia_, Curso_deg_, Duración_s, Elevación_, Tiempo, and Cuenta_de_. The first row is highlighted with a green border.

	Lote	Conjunto_d	Producto	Id_obj_	Distancia_	Curso_deg_	Duración_s	Elevación_	Tiempo	Cuenta_de_
1	1	18/01/17-10:18:...	Nitrato pot.	1835,0000	2,2700	152,5000	1,0000	61,2900	2018-01-17	Activado
2	1	18/01/17-10:18:...	Nitrato pot.	1836,0000	2,2300	152,1000	1,0000	61,3150	2018-01-17	Activado
3	1	18/01/17-10:18:...	Nitrato pot.	1829,0000	2,2400	152,2000	1,0000	61,2890	2018-01-17	Activado
4	1	18/01/17-10:18:...	Nitrato pot.	1830,0000	2,3200	152,7000	1,0000	61,2930	2018-01-17	Activado
5	1	18/01/17-10:18:...	Nitrato pot.	1831,0000	2,3000	152,7000	1,0000	61,2880	2018-01-17	Activado
6	1	18/01/17-10:18:...	Nitrato pot.	1832,0000	2,3300	152,0000	1,0000	61,2770	2018-01-17	Activado
7	1	18/01/17-10:18:...	Nitrato pot.	1825,0000	2,2800	151,5000	1,0000	61,2240	2018-01-17	Activado
8	1	18/01/17-10:18:...	Nitrato pot.	1826,0000	2,2500	151,8000	1,0000	61,2500	2018-01-17	Activado
9	1	18/01/17-10:18:...	Nitrato pot.	1827,0000	2,2700	152,0000	1,0000	61,2530	2018-01-17	Activado
10	1	18/01/17-10:18:...	Nitrato pot.	1828,0000	2,3100	151,9000	1,0000	61,2590	2018-01-17	Activado
11	1	18/01/17-10:18:...	Nitrato pot.	1821,0000	2,2900	151,5000	1,0000	61,2080	2018-01-17	Activado
12	1	18/01/17-10:18:...	Nitrato pot.	1822,0000	2,2600	151,3000	1,0000	61,2190	2018-01-17	Activado
13	1	18/01/17-10:18:...	Nitrato pot.	1823,0000	2,2700	151,2000	1,0000	61,2290	2018-01-17	Activado
14	1	18/01/17-10:18:...	Nitrato pot.	1824,0000	2,2800	151,4000	1,0000	61,2260	2018-01-17	Activado
15	1	18/01/17-10:18:...	Nitrato pot.	1817,0000	2,3200	152,3000	1,0000	61,1930	2018-01-17	Activado
16	1	18/01/17-10:18:...	Nitrato pot.	1818,0000	2,2500	153,3000	1,0000	61,1950	2018-01-17	Activado

Figura 2.13 Tabla de atributos de datos de cosecha

Esta interfaz posibilita realizar diversos procesamientos de los datos de cosecha, con el objetivo de: corregir valores erróneos a partir de la correlación con mediciones indirectas de otras variables exportadas; la supresión de valores fuera de lo normal; la interpolación de variables en lugares donde se ha perdido la conexión con el servicio de posicionamiento; entre otros. También es posible la obtención de la información no espacial registrada por la maquinaria durante toda la temporada de cosecha, como es el consumo neto de combustible empleado, las horas totales de trabajo del motor, así como el tiempo perdido (máquina encendida sin trabajar). De manera general, toda esta información, es resumida en informes de operación para su uso por parte del personal administrativo.

2.6.1 Informes de Operación

La creación de Informes de Operación es la potencialidad de los software de gestión destinada a visualizar los valores estadísticos (máximo, mínimo, promedio y total) de las variables exportadas por la maquinaria. Esta información puede ser agrupada según los elementos de administración del área cultivable. Entre los informes más empleados por los usuarios de las nuevas tecnologías agrícolas, se encuentran: el de operador, uso de recursos y resumen de cosecha. Estos posibilitan agrupar la información en función del elemento seleccionado facilitando los análisis posteriores.

Los datos a mostrar pueden ser tomados directamente desde el monitor, producto de análisis realizados por el software, e inclusive, pueden ser añadidos manualmente en caso de no contarse con el sensor requerido. A partir de encuentros técnicos realizados con los directivos de la Empresa Azucarera de Villa Clara, se constató que entre las variables manipuladas por su actual sistema de control de flota se encuentran:

- Distancia recorrida (m)
- Área Cosechada (ha)
- Velocidad Promedio (km/h)
- Tiempo de trabajo (h)
- Consumo total de combustible (l)
- Índice de Consumo (l/h)

Todos los atributos citados anteriormente, así como los índices producto de la combinación de ellos, pueden ser perfectamente reproducidos en los diferentes informes de operación. Esta funcionalidad, posibilita sustituir el engorroso proceso de recolección manual de los datos por parte del personal de la Empresa Azucarera.

2.7 Consideraciones finales del capítulo

Con la utilización de los software libre QGIS, PostgreSQL y *OpenGeo*, permite la conformación de un Sistema de Información Geográfica que propicie el incremento del rendimiento agrícola del cultivo de la caña de azúcar.

El software de procesamiento QGIS posee herramientas que sustentan la ejecución de los procedimientos necesarios para la aplicación de técnicas avanzadas de cultivo.

Existe gran variedad de información geoespacial que sirve de base para la toma de decisiones oportunas de carácter administrativo enfocada a la planificación de futuras cosechas con mayores rendimientos.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el siguiente capítulo se presentan algunas de las funcionalidades y posibles aplicaciones del SIG objeto de estudio de la presente investigación. Es preciso señalar que la zonificación de áreas cañeras y los datos de cosecha de los equipos que se presentarán en este acápite, fueron provistos por el personal del Central Azucarero Héctor Rodríguez, adscrito a la Empresa Azucarera de Villa Clara. Ello constituye evidencia experimental de la posibilidad de implementación de este sistema en la agroindustria azucarera. Entre las aplicaciones a mostrar, se puede destacar: la gestión de la información geoespacial a partir de servicios satelitales y la fiscalización de las operaciones agrícolas de las maquinarias en torno a sustentar la toma de decisiones administrativas.

3.1 Gestión de la información geoespacial

El empleo de diversas fuentes de información de un SIG, constituye un elemento enriquecedor para sustentar las prácticas de agricultura avanzada. A su vez la gestión y almacenamiento de los grandes volúmenes de datos proporcionados por las distintas fuentes, constituye una de las problemáticas enfrentada por los usuarios de la geomática. Tal como se planteó en el CAPÍTULO 2, para el SIG en cuestión se empleó el SGBD PostgreSQL, con su complemento PostGIS. Este concentrará la información geoespacial en un único sitio, el cual podrá ser accedido por distintos usuarios, atendiendo a sus roles y privilegios; para ello se cuenta con dos formas de acceso: el software QGIS y la página web servida por *OpenGeo Suite* (Figura 3.1).

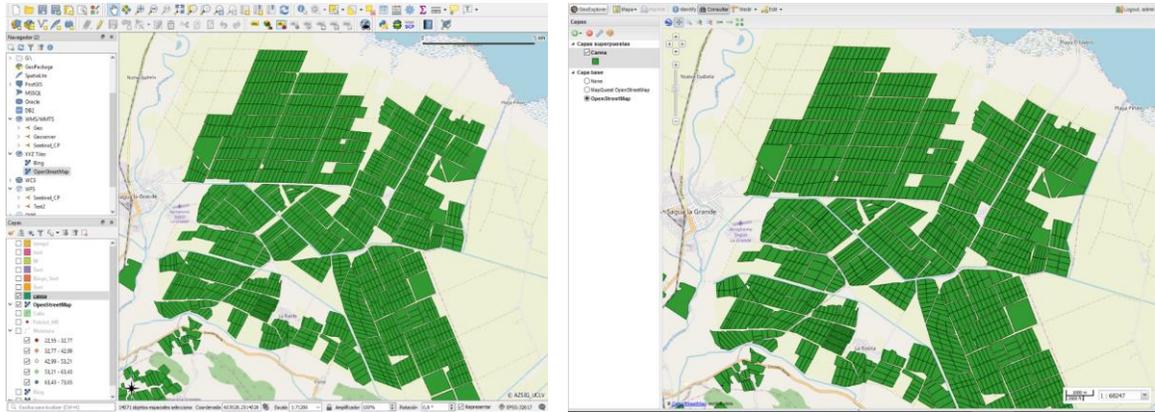


Figura 3.1 Interfaces de acceso al SIG de QGIS (Izquierda) y OpenGeo (derecha)

El acceso a través del software QGIS, permitió llevar a cabo las configuraciones necesarias con el SGBD, los servicios web y demás fuentes de información. A su vez, QGIS posee las interfaces gráficas de las herramientas empleadas para el procesamiento de la información geoespacial.

Por su parte la interfaz web, proporcionó mayor simplicidad y difusión a los diferentes datos geoespaciales manipulados en el SIG. Dicha herramienta permitió resumir de una manera más simplificada la información publicada y a su vez se le proporcionó, a esta interfaz capacidades para:

- La personalización de los estilos de presentación de las capas de información.
- La realización de consultas a la base de datos, con el fin de filtrar los contenidos publicados.
- La edición de los metadatos asociados a las diferentes capas de información.
- La posibilidad de añadir y eliminar capas al espacio de trabajo, así como subir nuevos archivos a la base de datos.

De forma general, las combinaciones de las interfaces referidas con anterioridad posibilitaron llevara cabo las diferentes aplicaciones presentadas a continuación.

3.2 Empleo de servicios satelitales

La identificación de áreas sembradas, la discriminación varietal, la estimación de productividad, entre otras, constituyen informaciones de las áreas cultivables que generalmente no son fácilmente obtenidas en nuestro país. En estos casos, las imágenes aéreas y satelitales han mostrado ser herramientas alternativas, útiles y económicas para adquirir esta información de una manera rápida y precisa. El acceso a servicios satelitales a través de internet, posibilitó la obtención de la información base para aplicaciones como: la identificación de áreas sembradas, la estimación de variables biofísicas y el cálculo de coeficiente de cultivo; las cuales serán detalladas a continuación.

3.2.1 Identificación de áreas sembradas

A partir de las imágenes provistas por S2, se actualizó la información catastral de las áreas cultivables pertenecientes al Azucarero Héctor Rodríguez. Esto constituye un elemento de gran importancia para las estimaciones de productividad cuando se expresa en toneladas por hectárea (ton/ha).

En aras de proveer la información más actualizada posible, se configuró un servicio WMS con el navegador de S2. Para ello, se creó una conexión entre el SIG en cuestión y el navegador del servicio satelital, a partir de una URL tal como se aprecia en la Figura 3.2.

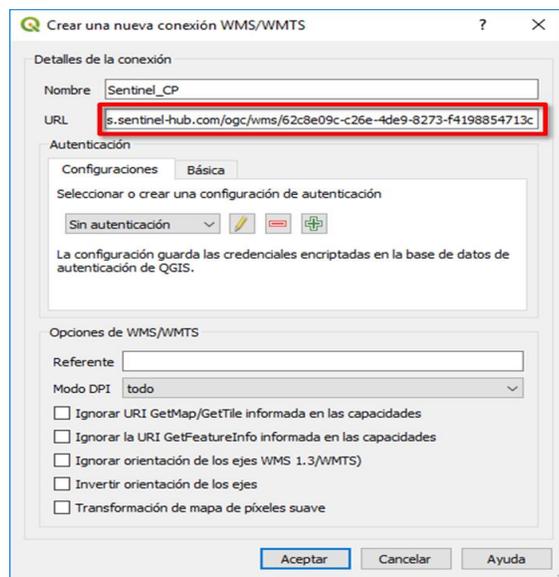


Figura 3.2 Configuración del servicio WMS de QGIS con el navegador de S2

Luego de configurada la conexión, el SIG adquiere la capacidad de representar, debajo del área de trabajo, las diferentes imágenes captadas por el servicio satelital. En la representación mostrada en la Figura 3.3 se puede observar las diferencias existentes entre las áreas reportada por los especialistas de las empresas azucareras y la información real de la parcela. A partir de las herramientas presentes en QGIS, fue posible corregir las representaciones geométricas de las zonas cultivables, haciéndolas coincidir con su extensión real en el campo. Posteriormente, a través de la herramienta “calculadora de campo”, se actualizó la información geométrica de la base cartográfica.



Figura 3.3 Identificación de errores topográficos de áreas cultivables. Información con errores (izquierda). Información corregida (derecha)

Es importante añadir que, con la modificación de la geometría representativa de la zonificación de áreas cañeras, se actualiza también la información temática publicada en la base de datos PostgreSQL. Para ello, se empleó la herramienta calculadora de campo (Figura 3.4) que permitió actualizar la información del área en la tabla de atributos de la capa de caña; a partir de la función de geometría “\$area”. La ejecución de este algoritmo, en los ficheros alojados en la base de datos central, garantiza servir la información actualizada a los diferentes usuarios, lo que evita el trasiego de información a través de dispositivos externos de almacenamiento.

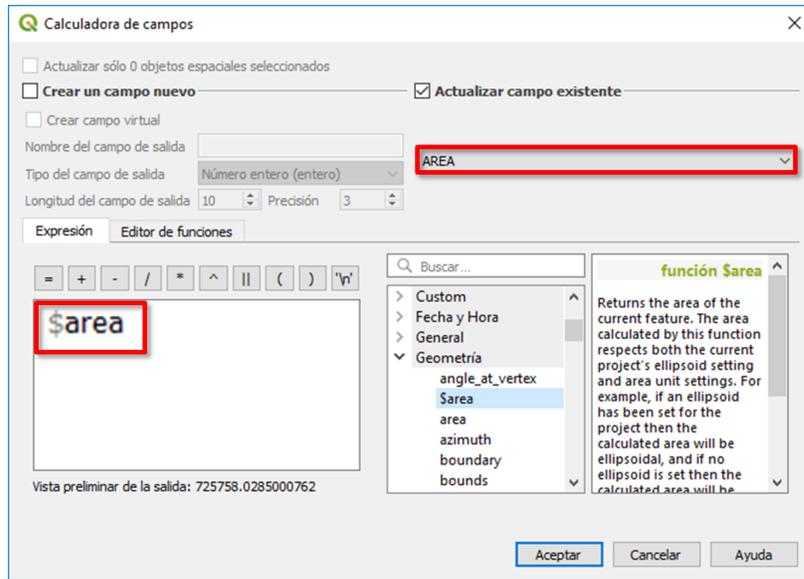


Figura 3.4. Actualización del área en la capa de caña

3.2.2 Cálculo del coeficiente de cultivo

Conforme a lo expresado en el epígrafe 2.5.3, fue posible la obtención indirecta del comportamiento del coeficiente del cultivo kc a partir de valores de NDVI. Para la obtención de los valores de índice, se configuró un WMS (Figura 3.5), con la potencialidad de interactuar con el mapa servido.

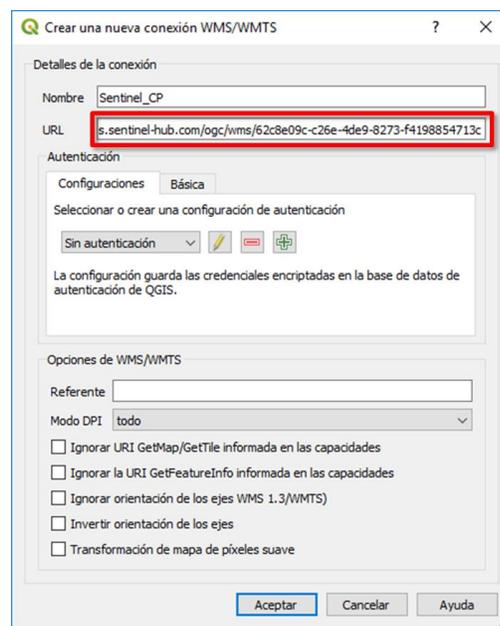


Figura 3.5 Configuración del servicio WMS de QGIS

Una vez cargada la información referente al NDVI, se procesó la imagen a partir de la herramienta “calculadora ráster” (Figura 3.6), donde se implementó la ecuación (2.1) para el cálculo de la kc del cultivo.

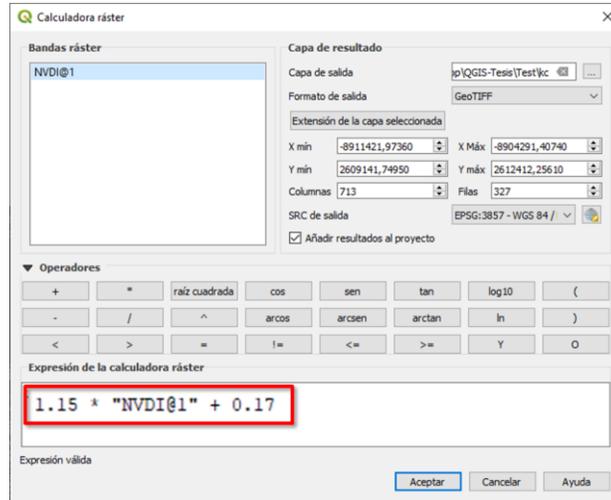


Figura 3.6 Cálculo de kc a partir de NDVI en calculadora ráster

La ejecución de esta herramienta, permitió la confección de un mapa representativo del comportamiento de la kc del cultivo (Figura 3.7), lo que constituye una estimación indirecta del consumo de agua ocurrido en la superficie del área cultivable, en función de los diferentes factores meteorológicos que inciden sobre el cultivo.

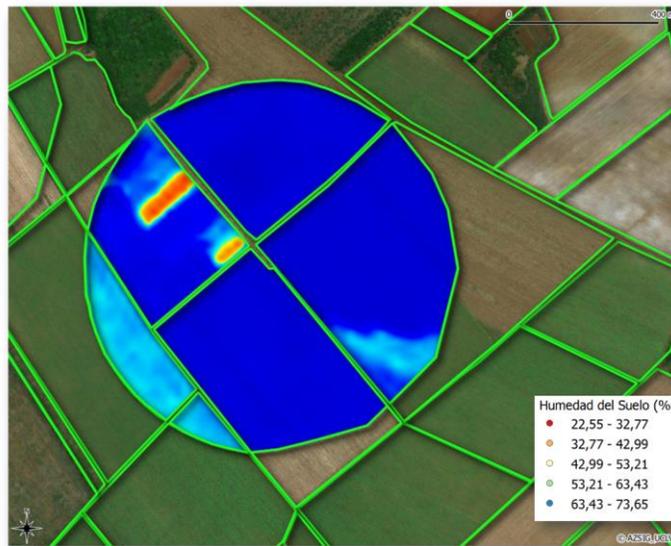


Figura 3.7 Mapa de la kc del cultivo obtenido a partir de NDVI

La obtención de kc a partir de índices vegetativos obtenidos por medio de imágenes satelitales; permite el seguimiento temporal de la evolución del cultivo durante sus diferentes fases de desarrollo y a su vez, sienta las bases para la aplicación de técnicas de riego de precisión en el cultivo de la gramínea.

3.2.3 Estimación de variables biofísicas

De modo semejante, fue posible la confección de un mapa de representativo del Índice de Área Foliar a partir de los valores del EVI. Para la obtención de los valores base, se empleó el WMS configurado con anterioridad, sólo que en este caso se trabajó con la información referente al EVI. Seguidamente, se procesó la imagen a partir de la herramienta “calculadora ráster” (Figura 3.8), donde se implementó la ecuación (2.2) para el cálculo del índice requerido.

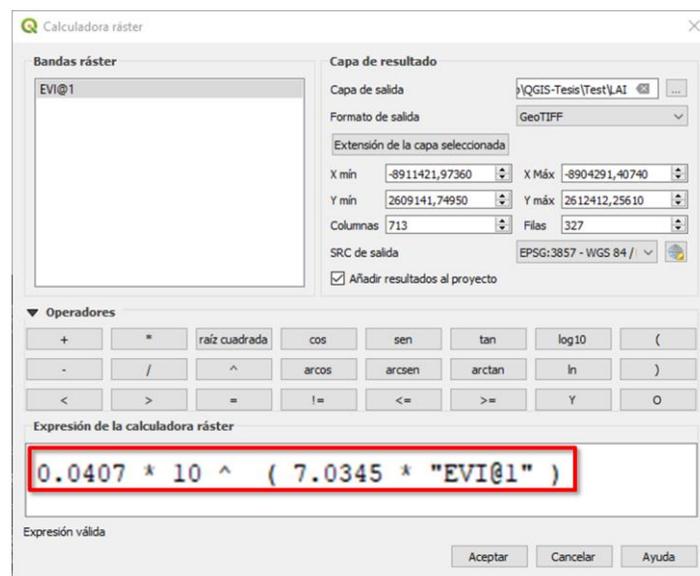


Figura 3.8 Cálculo de LAI a partir de EVI en calculadora ráster

Como resultado de esta operación, se obtuvo el mapa mostrado en la Figura 3.9, donde se visualiza en escala de colores la información contenida en el índice calculado en forma de fichero vectorial. Ello da paso al análisis estadístico de los mismos, con lo que es posible el diseño y validación de modelos representativos del comportamiento del cultivo, por ejemplo, la estimación de productividad. Este último es un parámetro de gran importancia para validar la aplicación de nuevos tratamientos de cultivo, así como planear con anticipación las actividades en el campo.

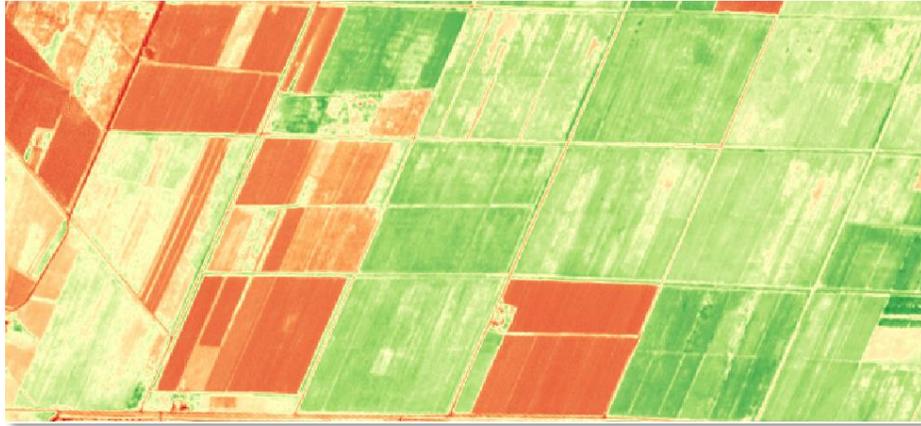


Figura 3.9 LAI calculado a partir de NDVI

Hasta la fecha, el método más empelado en nuestro país para la predicción de producción por parte de los agricultores, está basado en su experiencia en campo. En este sentido, el uso de la información obtenida por sensores remotos para la caracterización espectral de los campos, facilita el desarrollo de modelos agroclimáticos, para la determinación tanto de los volúmenes de producción como la productividad del cultivo (Peñaherrera, González, and Cruz 2005).

3.3 Sistema de toma de decisiones

La integración de los SIG a las prácticas agónicas de avanzada, pone a disposición de los agricultores, el desarrollo existente de las TIC; esto a su vez, posibilita incrementar la eficiencia productiva y reducir el impacto ambiental. Para el caso de las maquinarias agrícolas de avanzada, la integración con estas tecnologías proporciona, además un mayor control de maquinaria y los insumos empleadas en las diferentes actividades agrícolas.

El AFS figuran como una de los avances más significativos en la agricultura desde la llegada de la mecanización. Ello ha dado lugar, entre otras a la aplicación de tecnologías como el Control de Pasadas en el Campo, el cual constituye un aspecto sensible para la gestión sostenible y la conservación del suelo. Esto es respaldado por las potencialidades de gestión de las rutas de tránsito intraparceldaria, lo que posibilita la creación de una ruta patrón a seguir y su posterior análisis de cumplimiento.

3.3.1 Fiscalización de operaciones en el campo

Las potencialidades de exportación de los datos de cosecha por parte de las maquinarias de AFS importadas al país, permitió analizar de forma automatizada los parámetros de funcionamiento de dichos equipos (Perez-Garcia et al. 2018). Esta es una de las mayores problemáticas de las empresas azucareras del país, ya que hasta la fecha solo se monitoreaba el recorrido de estas máquinas a partir de dispositivos externos y mediciones manuales. En la Figura 3.10 se muestra un mapa temático representativo de la velocidad desarrollada por una pulverizadora *Case IH Patriot 250*.



Figura 3.10 Mapa temático de la pulverizadora *Case IH Patriot 250*

Adicionalmente, en la figura anterior se exhibe de forma puntual, el comportamiento de algunos de los parámetros técnico empleados por el personal de la Empresa Azucarera para fiscalización de las operaciones en el campo y el registro de insumos consumidos en las labores agrícolas. Entre estos se encuentran: el nombre del producto, la dosis de aplicación configurada y la cantidad de producto esparcido en el campo.

De forma similar, todas las variables citadas anteriormente, e incluso los índices producto de la combinación de ellas, pueden ser perfectamente reproducidas en mapas similares e incluso en informes resumen. En la Tabla 3.1, se reflejan las variables que intervienen en los actuales análisis realizados por el personal de AZCUBA. Estas pueden ser agrupadas según el área de trabajo, el operador o simplemente la maquinaria.

Tabla 3.1. Informe de consumo de combustible

Agricultor:	UBPC "Monte Lucas"
Granja:	"1304"
Año:	2017
Producto:	Caña de Azúcar
Operación:	Pulverización



Lote	Campo	Distancia Recorrida km	Área Recorrida ha	Combustible Utilizado L	Velocidad Promedio km/hr	Proporción Meta L/hr	Proporción de Aplicación
"03"	"01"	10,28	6,124	303,23	7,562	200	1090,072
	"02"	5,28	3,222	181,47	5,031	200	496,188
	"03"	12,02	7,165	321,45	6,945	200	1576,3
"04"	"01"	16,02	7,925	367,98	7,812	200	1585
	"02"	12,13	5,938	314,37	6,854	200	1181,662
	"03"	12,14	6,054	346,42	6,5	200	1198,692
Totales		67,87	36,428	1834,92	6,784	200	7127,914

Promedio

Promedio

El elevado gasto de los insumos empleados en las labores agrícolas, según (Ripoli, Ripoli, and Júnior 2004) se corresponde con aproximadamente el 40 % de los gastos de fabricación de azúcar. Por cuanto, el análisis estadístico de estas variables constituye elementos que deben ser seriamente analizados para conocer la eficiencia de la producción. A su vez, la supervisión de diferentes parámetros mecánicos del motor, durante la realización de las labores agrícolas, aporta valiosa información en la búsqueda de estrategias para reducir la emisión de sustancias nocivas y prolongar la vida útil de la maquinaria (Barreiro Elorza, Diezma Iglesias, and Baguena Isiegas 2010).

Los análisis de fiscalización de las operaciones en el campo, constituyen la base sobre la que se sustenta la aplicación de tecnologías agrícolas de avanzada como los Control de pasadas en el Campo y las VRT. Ello, a su vez permite el ahorro sustancial de insumos en las labores agrícolas al tiempo que permite reducir los costos y mantener la cantidad y calidad de las cosechas de forma sostenible.

3.3.2 Aplicación de dosis variable

La prescripción de aplicación de bioestimulantes siempre ha sido un reto para los agricultores, por la dificultad de predecir las necesidades del cultivo durante la cosecha. En tal caso, las dosis de aplicación obtenidas de manera analítica son sobredimensionadas con

el fin de suplir las máximas necesidades de los cultivos de forma homogénea, lo cual incurre en el malgasto de insumos.

La aplicación de dosis de variable, constituye la práctica agronómica con las potencialidades de suplir las necesidades puntuales de los cultivos empleando la cantidad de producto requerido; tomándose como base, un mapa de prescripción confeccionado a partir de la medición de determinados parámetros de los cultivos. Para la confección de mapas de prescripción destinados a aplicaciones de VRT, se realizó un experimento de tratamiento diferenciado del bioestimulante *FitoMas-E*, por ser uno de los productos más caros en el mercado internacional.

Para la creación del mapa de prescripción, se empleó el NDVI provisto por las imágenes de S2 y a partir de la herramienta *Raster values to point*, se obtuvo el mapa vectorial mostrado en la Figura 3.11. En el proceso de confección de dicho mapa, se asociaron las diferentes tasas de aplicación con el fin de ajustarse a las capacidades mínimas de actuación de la pulverizadora Case IH Patriot 250 (CNH Industrial 2013).



Figura 3.11 Mapa de prescripción para aplicación de FitoMas-E

Es preciso señalar que la confección de mapas de prescripción a partir de técnicas de prescripción remota puede extenderse al empleo de toda la gama de IV, relacionados a partir

de ecuaciones que permitan no solo trabajar con una sola dosis de fertilizante, sino tantas dosis como áreas significativamente homogéneas existan en la explotación.

3.4 Análisis económico y medioambiental

El empleo de SIG en áreas como la agricultura, permite la recopilación de gran cantidad de información de las áreas cultivables, ya sea durante la cosecha o previo a ella. De esta manera, es posible la planificación de tratamientos diferenciados de cultivo en base a una variabilidad espacial intraparcularia. Ello se ve traducido en un uso eficiente de insumos lo que conlleva a un sustancial ahorro en costos de producción que, en su totalidad, compensan el gasto derivado del empleo de estas nuevas tecnologías.

Otro de los beneficios económicos proporcionados por la aplicación de esta herramienta, se encuentra asociado a la planificación del uso de recursos energéticos capaz de satisfacer la demanda de las actividades agrícolas del modo más económico y seguro posible. Esto es posible a partir de la fiscalización de las operaciones en el campo y el análisis de las rutas óptimas para la planificación del corte de caña.

Es de aclararse que el SIG propuesto, está basado en el empleo de software libre y servicios web difundidos sin costo alguno en internet; lo que evita tener que comprar licencias para el uso de los programas computacionales. A su vez, esta característica se integra en las estrategias gubernamentales de migración hacia este tipo de programas e informatización de la sociedad,

Desde una perspectiva medioambiental, el empleo de los SIG en ramos como la agricultura, posibilita una mejor aplicación de herbicidas, insecticidas, fungicidas; basados en el monitoreo periódico de los cultivos. Ello a su vez puede generar enormes beneficios en términos de reducciones de gases de efecto invernadero y menos contaminación de los suelos. Además, es posible la detección temprana de las necesidades hídricas de las parcelas, lo que posibilita realizar un uso eficiente del recurso agua aplicado a los cultivos.

3.5 Consideraciones finales del capítulo

La utilización de las imágenes provista por el servicio satelital S ntinel-2, posibilitó la actualización de la zonificación de las áreas cañeras pertenecientes al Central Azucarero Héctor Rodríguez de la Provincia de Villa Clara.

La integración del software QGIS con la plataforma web *OpenGeo* y el sistema gestor de base de datos PostgreSQL, garantiza la visibilidad y accesibilidad de los datos geoespaciales manipulados por los usuarios de las técnicas avanzadas de cultivo, independientemente de sus conocimientos de geomática.

A partir de las imágenes aéreas y las herramientas presentes en el software QGIS, es posible la confección de mapas de prescripción para llevar a cabo técnicas de dosis variables de aplicación con pulverizadoras automatizadas; lo que permite realizar un tratamiento diferenciado del cultivo en función de las necesidades puntuales de los mismos.

El empleo de la información proporcionada por las maquinarias agrícolas del Sistema Avanzado de Cultivo, permite la fiscalización de las actividades realizadas por estos equipos; lo cual posibilita mejorar la gestión y el control de los insumos empleados durante sus operaciones habituales.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

El desarrollo de la presente investigación ha permitido la gestión unificada de la información relacionada con las prácticas de agricultura avanzada aplicadas al cultivo de la caña de azúcar en Cuba; sobre la base de un Sistema de Información Geográfica desarrollado a partir de la integración de un software de procesamiento, un gestor de bases de datos y un geoportal. Dicha plataforma ha sido evaluada exitosamente en áreas y procesos del Central Azucarero Héctor Rodríguez de la provincia de Villa Clara. A partir de los resultados obtenidos, se plantea como conclusiones:

- 1 A partir del estudio realizado del marco teórico, se establece que integración funcional de los software libres QGIS, PostgreSQL y OpenGeo Suite, conforma un Sistema de Información Geográfica para la gestión unificada de las prácticas agronómicas de avanzada.
- 2 Con el empleo del Sistema de Información Geográfica diseñado, es posible establecer regímenes de trabajo para la realización de actividades como la aplicación de dosis variables de fertilizantes y el riego de precisión.
- 3 La actualización de la información catastral de las áreas de cultivo, la estimación de las variables biofísicas y la fiscalización de las operaciones de las maquinarias agrícolas, se demuestra la capacidad del Sistema de Información Geográfica diseñado para gestionar las técnicas avanzadas de cultivo.

Recomendaciones

Como principales recomendaciones del presente trabajo se proponen:

- 1 Trabajar en la generalización de este resultado al resto de la empresa azucarera de Villa Clara y posteriormente a escala de país.
- 2 Evaluar la alternativa de implementar la plataforma basada en Sistemas Operativos como Linux.
- 3 Enfocar futuras investigaciones en la implementación de estrategias de inteligencia artificial con el fin de obtener mayor información de los datos geoespaciales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albarenque, Susana María and Juan Pablo Veléz. 2011. *Técnicas Para El Procesamiento de Mapas de Rendimiento*. Primera Ed. Paraná: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Anselin, Luc. 1989. "What Is Special About Spatial Data? Alternative Perspectives on Spatial Data Analysis." in *Symposium on Spatial Statistics, Past, Present and Future*.
- Avello-Fernández, Lianet, Eduardo Izaguirre-Castellanos, Manuel Luciano Vidal-Díaz, Alain S. Martínez-Laguardia, and Luis Hernández-Santana. 2018. "Remote Supervision and Control Based on Wireless Technology to Operation of Central Pivot Irrigation Machine." *Sistemas y Telemática* 16(44):63–74.
- Balmaseda, C. I. and Madelin Romero Ii. 2012. "Desarrollo de Sistema de Información Geográfica Para Gestión Fitosanitaria En Unidades Productivas de Caña de Azúcar (*Saccharum Spp* .) (*Saccharum Spp* .) Production." *Revista de Protección Vegetal* 27(3):206–9.
- Barreiro Elorza, Pilar, Belen Diezma Iglesias, and Eva Baguena Isiegas. 2010. "Aplicación de Las Técnicas de Agricultura de Precisión Al Ahorro de Combustible En El Tractor." *Tierras de Castilla y León. Agricultura* (165):34–43.
- Becerras, Everaldo, Rafael Más-Martínez, Emma Pineda, Bárbara Barreto, Nadyesca Hernández, Manuel L. Vidal, Isnel Rodríguez, Fidel Acosta, and Amaury Cruz. 2008. "Ordenamiento Territorial y Sistema de Información En La Agricultura Cañera En Villa Clara." *Centro Agrícola* 35(4):47–52.
- Benítez-Puig, Ledy, Yudith Viñas-Quintero, Mario E. de León-Ortiz, Sergio Guillén-Sosa, and René Gallego-Domínguez. 2018. "Contribución Al Manejo Sostenible Del Cultivo

- de La Caña de Azúcar En Cuba.” *Revista Ingeniería Agrícola* 8(2):62–67.
- Berardocco, M., Tomás Hartmann, and J. Hibert. 2004. “Utilización de Sensores Remotos En Agricultura de Precisión. Introducción Al Uso de Cámara Digital En El Manejo de Sitio Especifico.” *Instituto de Ingeniería Rural, INTA*.
- Borràs, J., J. Delegido, A. Pezzola, M. Pereira, G. Morassi, and G. Camps-Valls. 2017. “Clasificación de Usos Del Suelo a Partir de Imágenes Sentinel-2.” *Revista de Teledetección* (48):55.
- CNH Industrial. 2013. *Pulverizadora Patriot 250*.
- Conrad, O., B. Bechtel, M. Bock, H. Dietrich, E. Fischer, L. Gerlitz, J. Wehberg, V. Wichmann, and J. Böhner. 2015. “System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4.” *Geoscientific Model Development* 8(7):1991–2007.
- Cuesta, A., A. Montoro, a. M. Jochum, P. López, and A. Calera. 2005. “Metodología Operativa Para La Obtención de Coeficientes de Cultivos Desde Imágenes de Satélite.” *Itea* 101(3):212–24.
- Daquinta-Gradaille, Antonio, Claudio Pérez-Olmo, Julio Águila-Gómez, Rigoberto Pérez-Reyes, and Eloy García-Aragón. 2018. “Metodología de Análisis de Criticidad Integral de Las Cosechadoras de Caña de Azúcar CASE IH.” *Revista Ingeniería Agrícola* 8(2):55–61.
- Driemeier, Calros Eduardo, Liu Yi Ling, Angelica O. Pontes, Guilherme M. Sanches, Henrique C. J. Franco, Paulo S. G. Magalhaes, and Joao E. Ferreira. 2014. “Data Analysis Workflow for Experiments in Sugarcane Precision Agriculture.” in *IEEE 10th International Conference on eScience*. IEEE Computer Society.
- Drusch, M., U. Del Bello, S. Carlier, O. Colin, V. Fernandez, F. Gascon, B. Hoersch, C. Isola, P. Laberinti, P. Martimort, A. Meygret, F. Spoto, O. Sy, F. Marchese, and P. Bargellini. 2012. “Sentinel-2: ESA’s Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services.” *Remote Sensing of Environment* 120:25–36.
- Faci, J. M., R. Salvador, E. Playán, and Heinz Sourell. 2001. “Comparison of Fixed and Rotating Spray Plate Sprinklers.” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 127(4):224–33.

- Gangadharan, G. R., Vincenzo D'Andrea, Stefano De Paoli, and Michael Weiss. 2012. "Managing License Compliance in Free and Open Source Software Development." *Information Systems Frontiers* 14(2):143–54.
- Garay, Domingo and Juan Agüero. 2013. *Introducción a Los SIG Software QGIS*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- González-Suárez, Guillermo, Rafael Cruz-Iglesias, José Luis Capote-Fernández, José David Farré, Raquel Fernández-Pérez, Lineidys Fernández-Águila, and Mildrey Rodríguez González del Valle. 2011. "MovilWeb: Aplicación Para El Control de Flotas Basada En PostgreSQL." *Revista Cubana de Ciencias Informáticas (RCCI)* 5(1):1–12.
- Gonzalez Ruiz, Miguel Alejandro. 2014. "Software y Herramientas Libres Para Desarrollo de Los Sistemas de Información Geográfica." Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Granell, Carlos, Laura Díaz, and Michael Gould. 2010. "Service-Oriented Applications for Environmental Models: Reusable Geospatial Services." *Environmental Modelling & Software* 25(2):182–98.
- Hezarjaribi, Aboutaleb and Heinz Sourell. 2008. "Variable Water Application Depths from a Centre Pivot Irrigation Control System." *Journal of Agricultural Machinery Science* 4(2):111–16.
- Inoue, Y., S. Morinaga, and A. Tomita. 2000. "A Blimp-Based Remote Sensing System for Low-Altitude Monitoring of Plant Variables: A Preliminary Experiment for Agricultural and Ecological Applications." *International Journal of Remote Sensing* 21(2):379–85.
- Kamińska, Iwona A., Anna Ołdak, and Waldemar A. Turski. 2004. "Geographical Information System (GIS) as a Tool for Monitoring and Analysing Pesticide Pollution and Its Impact on Public Health." *Annals of Agricultural and Environmental Medicine* 11(2):181–84.
- Karnatak, Harish Chandra, Sameer Saran, Karamjit Bhatia, and P. S. Roy. 2007. "Multicriteria Spatial Decision Analysis in Web GIS Environment." *GeoInformatica* 11(4):407–29.

- Keating, B. .. and R. .. McCown. 2001. "Advances in Farming Systems Analysis and Intervention." *Agricultural Systems* 70(2–3):555–79.
- Kharuf-Gutierrez, Samy, Luis Hernández-Santana, Rubén Orozco-Morales, Osmany de la C. Aday-Díaz, and Irenaldo Delgado-Mora. 2018. "Análisis de Imágenes Multiespectrales Adquiridas Con Vehículos Aéreos No Tripulados." *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones* 39(2):79–91.
- Leroux, Corentin, Hazaël Jones, Léo Pichon, Serge Guillaume, Julien Lamour, James Taylor, Olivier Naud, Thomas Crestey, Jean-Luc Lablee, and Bruno Tisseyre. 2018. "GeoFIS: An Open Source, Decision-Support Tool for Precision Agriculture Data." *Agriculture* 8(6):73.
- Li, M., L. Fang, X. Huang, and C. Goh. 2015. "A Spatial-Temporal Analysis of Hotels in Urban Tourism Destination." *International Journal of Hospitality Management* 45:34–43.
- Maguire, David J. and Paul A. Longley. 2005. "The Emergence of Geoportals and Their Role in Spatial Data Infrastructures." *Computers, Environment and Urban Systems* 29(1):3–14.
- Maohua, Wang. 2001. "Possible Adoption of Precision Agriculture for Developing Countries at the Threshold of the New Millennium." *Computers and Electronics in Agriculture* 30(1–3):45–50.
- Montesinos-Lajara, Miguel and Jorge Gaspar Sanz-Salinas. 2008. "Panorama Actual Del Ecosistema de Software Libre Para SIG." in *I Jornadas de SIG Libre*.
- Morales, Aurelio. 2017. "¿Qué Es OpenGeo Suite?" *Mapping GIS*. Retrieved September 12, 2018 (<https://mappinggis.com/2012/05/que-es-opengeo-suite/>).
- Murillo, Paulo and Javier Carbonell. 2012. *Principios y Aplicaciones de La Percepción Remota En El Cultivo de La Caña de Azúcar En Colombia*. edited by V. Carrillo Camacho and A. Arias Villegas. Cali, República de Colombia.
- Neteler, Markus, M. Hamish Bowman, Martin Landa, and Markus Metz. 2012. "GRASS GIS: A Multi-Purpose Open Source GIS." *Environmental Modelling & Software* 31:124–30.

- Olaya, Víctor. 2014. *Sistemas de Información Geográfica*.
- Palacios-Vélez, Enrique, Julio Enrique Palacios-Sánchez, and Luis Alberto Palacios-Sánchez. 2011. "Agricultura de Riego Asistida Con Satélites." *Tecnología y Ciencias Del Agua* II(2):69–81.
- Palaniswami, C., P. Gopalasundaram, and A. Bhaskaran. 2011. "Application of GPS and GIS in Sugarcane Agriculture." *Sugar Tech* 13(4):360–65.
- Peñaherrera, Edgar, Augusto González, and Cristina Cruz. 2005. "Utilización de Datos Multiespectrales Aeroportados En Agricultura de Precisión." *Mapping* (105):68–77.
- Percivall, George. 2010. "Progress in OGC Web Services Interoperability Development." Pp. 37–61 in *Standard-Based Data and Information Systems for Earth Observation*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Perez-Garcia, Carlos A., Robby Gustabello-Cogle, and Luis Hernández-Santana. 2018. "Empleo Del Software SMS Para La Gestión de Las Cosechadoras Cañeras CASE IH A8000." *Revista Ingeniería Agrícola* 8(4):37–42.
- Pitney Bowes Software Inc. 2008. "MapInfo® Pro Desktop GIS."
- Rigaux, Philippe, Michel Scholl, and Agnes Voisard. 2002. *Spatial Databases: With Application to GIS*. Morgan Kaufman.
- Ripoli, Tomaz Caetano Cannavam, Marco Lorenzo Cunali Ripoli, and Walter Francisco Molina Júnior. 2004. "Biomassa de Cana-de-Azúcar: Colheita, Energia e Ambiente."
- Rodríguez-Ortiz, Yunior, George Martín-Gutiérrez, Juan Alejandro Villazón-Gómez, Jorge Zaldivar, Raúl Peña-Pupo, and Roger Ramírez. 2010. "Soporte En La Toma de Decisiones Utilizando Un Sistema Geoespacial En La Agroindustria Azucarera de La Provincia de Holguín."
- Rojas-Martínez, Omara, Alegna Rodríguez-Fajardo, Carlos Vázquez-Acuña, Pablo Pablos-Reyes, and Yoleisis Borrero-Reynaldo. 2014. "Implementación de Un Sistema de Información Geográfica Para Las Decisiones En La Producción Cañera de Santiago de Cuba." *Ciencia En Su PC* (2):42–55.
- Shengru Tu, Mahdi Abdelguerfi, Shengru Tu, and Mahdi Abdelguerfi. 2006. "Web Services

- for Geographic Information Systems.” *IEEE Internet Computing* 10(5):13–15.
- Shi, X. and M. P. Kwan. 2015. “Introduction: Geospatial Health Research and Gis.” *Annals of GIS* 21(2):93–95.
- Silberschatz, Abraham, Henry F. Korth, and S. Sudarshan. 2006. *Fundamentos de Bases de Datos*. Cuarta Edi. Madrid, España.
- Sourell, H. and C. Sommer. 2002. “Irrigation and Sprinkling.” *Agricultural Engineering* 14:111–17.
- Sui, Daniel. 2014. “Opportunities and Impediments for Open GIS.” *Transactions in GIS* 18(1):1–24.
- Suprem, Abhijit, Nitaigour Mahalik, and Kiseon Kim. 2013. “A Review on Application of Technology Systems, Standards and Interfaces for Agriculture and Food Sector.” *Computer Standards & Interfaces* 35(4):355–64.
- Verstraete, M. M. and Bernard Pinty. 1996. “Designing Optimal Spectral Indexes for Remote Sensing Applications.” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 34(5):1254–65.
- Wang, Y. Q. 2014. “Meteoinfo: Gis Software for Meteorological Data Visualization and Analysis.” *Meteorological Applications* 21(2):360–68.
- Wang, Yuexuan, Yongcai Wang, Xiao Qi, and Liwen Xu. 2009. “OPAIMS: Open Architecture Precision Agriculture Information Monitoring System.” P. 233 in *Proceedings of the 2009 international conference on Compilers, architecture, and synthesis for embedded systems - CASES '09*. New York, New York, USA: ACM Press.
- Xavier, Alexandre C., Carlos A. Vettorazzi, Ronalton E. Machado, and others. 2004. “Relação Entre Índice de Área Foliar e Frações de Componentes Puros Do Modelo Linear de Mistura Espectral, Usando Imagens ETM+/Landsat.” *Engenharia. Agrícola* 24(2):422–30.
- Ye, Jiuyan, Bin Chen, Qingfeng Liu, and Yu Fang. 2013. “A Precision Agriculture Management System Based on Internet of Things and WebGIS.” *2013 21st International Conference on Geoinformatics* (2011):1–5.

ANEXOS

Anexo I

Datos de Cosecha

Variables exportadas por maquinarias Case IH	
Carga del motor	Potencia del motor
Código parada de emergencia	Presión aceite motor
Eficiencia de combustible (área)	Presión aceite motor fuera de rango
Elevación	Presión cortador base
Estado elevador	Productividad
Estado filtro de aceite OK	RPM del motor
Estado filtro de combustible OK	RPM velocidad del ventilador
Estado filtro de aire OK	Tasa de consumo de combustible (área)
Configuración cóncava	Tasa de consumo de combustible (tiempo)
Configuración criba 1	Temperatura del aceite hidráulico
Configuración criba 2	Temperatura del aceite hidráulico fuera de rango

Nivel de aceite hidráulico bajo	Temperatura de refrigerante
Nivel de aceite motor bajo	Temperatura del refrigerante fuera de rango
Nivel de potencia	Velocidad
Nivel de refrigerante bajo	Voltaje de batería