

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
VICERRECTORÍA DE DOCENCIA
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

**ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR
MEDIANTE ÍNDICES DE VEGETACIÓN Y MONITORES DE RENDIMIENTO
DURANTE EL PERIODO DE ZAFRA 2021 – 2022 EN LA EMPRESA CENTRAL
AZUCARERA TEMPISQUE S.A. (CATSA) GUANACASTE, COSTA RICA**

NATALIA HIDALGO MONGE

CARTAGO, 2022

ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR
MEDIANTE ÍNDICES DE VEGETACIÓN Y MONITORES DE RENDIMIENTO
DURANTE EL PERIODO DE ZAFRA 2021 – 2022 EN LA EMPRESA CENTRAL
AZUCARERA TEMPISQUE S.A. (CATSA) GUANACASTE, COSTA RICA

Natalia Hidalgo Monge

Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

Kerin Romero Calvo

Asesor

Isabel Guzmán Arias

Directora Escuela
Ingeniería Agrícola

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

CARTAGO, COSTA RICA

2022



Esta obra está bajo una Licencia Creative
Commons Atribución-NoComercial-
Compartirigual 4.0 Internacional.

CONSTANCIA DE DEFENSA PUBLICA DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

A las 8:00 horas del día 13 del mes de junio del año 2022 la estudiante:
Natalia Hidalgo Monge

presenta y defiende su trabajo de graduación titulado:

Análisis del rendimiento del cultivo de caña de azúcar mediante índices de vegetación
y monitores de rendimiento durante el periodo de zafra 2021 — 2022 en la Empresa
Central Azucarera Tempisque S.A. (CATSA) Guanacaste, Costa Rica

ante el Tribunal de Evaluación compuesto por los siguientes miembros:

Presidente (a): Laura Segura Serrano

Asesor (a) de la Escuela: Kerin Romero Calvo

Asesor (a) Externo (a): Gerardo Elizondo Cordero

Firman conforme lo dispone el Reglamento de Trabajos Finales de Graduación:

LAURA PATRICIA
SEGURA
SERRANO
(FIRMA)

Firmado digitalmente
por LAURA PATRICIA
SEGURA SERRANO
(FIRMA)
Fecha: 2022.06.13
10:08:12 -06'00'

PRESIDENTE (A)



ASESOR (A) EXTERNA(A)

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Firmado digitalmente
por KERIN FABIAN
ROMERO CALVO (FIRMA)
Fecha: 2022.06.13
13:42:00 -06'00'

ASESOR (A) DE LA ESCUELA

ESTUDIANTE

Dedicatoria

*A Dios en primer lugar, por guiar cada paso durante este camino
y permitirme concluir esta etapa con éxito*

*A mis padres y hermano, Jorge Hidalgo, Rocío Monge y Álvaro Hidalgo,
por la confianza y apoyo que siempre me han brindado.*

A Mima, por su amor incondicional.

Agradecimientos

A Dios por darme la oportunidad de culminar esta etapa de manera exitosa.

A mis padres,

por todo el sacrificio realizado durante estos años,

por ser un modelo a seguir y estar siempre para mí.

A mi familia, que siempre ha estado junto a mí en cada paso

y cuyo apoyo nunca me ha faltado.

A mis amigos y compañeros,

los cuales hicieron de esta etapa una experiencia única e inolvidable,

sin ellos no habría llegado hasta aquí, en especial Joselyn, Katherine y Dimas,

quienes fueron parte fundamental de todo este proceso.

A mis profesores,

Karolina Villagra por todo apoyo brindado y la confianza depositada en mí,

y Kerin Romero por ser una guía en el desarrollo de este proyecto.

A la empresa Central Azucarera Tempisque S.A. (CATSA)

y sus trabajadores por brindarme la oportunidad de llevar a cabo este proyecto;

especialmente a Gerardo Elizondo, por todos los conocimientos compartidos

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	13
ABSTRACT	15
1. INTRODUCCIÓN.....	17
2. OBJETIVOS	20
2.1 Objetivo General.....	21
2.2 Objetivos Específicos	21
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	22
3.1 Caña de azúcar	23
3.1.1 Manejo del cultivo	24
3.1.1.1 Preparación y siembra	24
3.1.1.2 Mantenimiento	25
3.1.1.3 Cosecha	27
3.1.2 Rendimientos	29
3.2 Agricultura de precisión.....	32
3.3 Fuentes de información en agricultura de precisión	33
3.3.1 Teledetección.....	34
3.3.1.1 Espectro electromagnético	34
3.3.1.2 Sensores remotos.....	35
3.3.1.3 Uso de sensores en el ámbito agrícola	37
3.3.1.4 Índices de vegetación	38
3.3.2 Monitoreo de rendimiento	40
3.3.3 Muestreos de campo	40
3.4 Tratamiento de la información.....	41
3.4.1 Datos espaciales.....	41
3.4.2 Sistemas de información geográfica.....	42
3.4.3 Correlación estadísticas e índices de correlación	43
3.5 Generación de productos	44
3.5.1 Mapas de rendimiento	44
3.5.2 Índices de vegetación.....	45
3.5.3 Zonas de manejo.....	45

3.6	Viabilidad económica	47
4.	METODOLOGÍA.....	49
4.1	Área de estudio	50
4.2	Obtención y preparación de datos.....	52
4.2.1	Datos de rendimiento.....	52
4.2.1.1	Recuperación de los datos.....	53
4.2.1.2	Post-procesamiento de la información.....	53
4.2.2	Imágenes satelitales	54
4.2.2.1	Descarga de los índices de vegetación.....	54
4.3	Correlación de la información	55
4.3.1	Relación espacial de las variables	56
4.3.2	Tratamiento de la información	56
5.	RESULTADOS.....	58
5.1	Registro de datos de cosecha	59
5.2	Mapas de productividad.....	59
5.3	Correlación entre rendimiento e índices de vegetación.....	65
5.4	Evaluación de las ecuaciones de correlación.....	66
5.5	Aplicación del modelo	68
5.6	Beneficios para la empresa	68
6.	CONCLUSIONES	70
7.	RECOMENDACIONES	72
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Información satélite Landsat 8.	36
Cuadro 2. Información satélite Sentinel 2.	37
Cuadro 3. Información de los lotes de estudio.	59
Cuadro 4. Rendimientos obtenidos con las ecuaciones de correlación.	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de una cosechadora de caña, con sus diferentes sistemas.	29
Figura 2. Monitor de cosecha y sensores ópticos.	30
Figura 3. Receptor StarFire 6000.	31
Figura 4. Vista de la pantalla, monitor de rendimiento.	31
Figura 5. Ejemplos aplicaciones de Agricultura de Precisión.	33
Figura 6. Espectro electromagnético.	35
Figura 7. Proceso para generar mapas de rendimiento.	44
Figura 8. Ejemplo de zonas de manejo según toneladas cosechadas.	46
Figura 9. Mapa Central Azucarera Tempisque S.A. zona Casco Central.	50
Figura 10. Mapa Central Azucarera Tempisque S.A. fincas zona norte.	51
Figura 11. Mapa de las áreas de estudio.	52
Figura 12. Diagrama de flujo de la correlación.	55
Figura 13. Mapa de productividad Coyolar-15.	60
Figura 14. Mapa de productividad Coyolar-16 al 18.	60
Figura 15. Mapa de productividad Coyolar-26 al 28.	61
Figura 16. Mapa de productividad Coyolar-36 al 40.	61
Figura 17. Mapa de productividad Coyolar-56 al 58.	62
Figura 18. Mapa de productividad Coyolar-86.	62
Figura 19. Mapa de productividad Garzones-40 al 43.	63
Figura 20. Mapa de productividad Garzones 45 al 47.	63
Figura 21. Mapa de productividad Garzones-65 al 66.	64
Figura 22. Mapa de productividad Gues-18 al 20.	64
Figura 23. Relación entre rendimientos de cosecha y distintos índices de vegetación.	65
Figura 24. Mapa de productividad a partir del monitor de cosecha.	66
Figura 25. Mapa de productividad generado a partir de los índices de vegetación.	67

RESUMEN

Actualmente, y gracias a los avances tecnológicos de los últimos años, la agricultura de precisión ha tenido un constante crecimiento dentro de las empresas productoras, tal como lo es la empresa Central Azucarera Tempisque S.A. Como parte de dicho crecimiento, se han ido implementando tecnologías que permiten obtener rendimientos de producción casi que en tiempo real al momento de la cosecha.

Parte de este proyecto consiste en sacarle provecho a la tecnologías presentes en la empresa, como lo son los monitores de rendimiento de cosecha, de esta manera el principal objetivo es generar un modelo de correlación y análisis de los rendimientos del cultivo de caña de azúcar mediante índices de vegetación y mapas de rendimiento para la creación de una herramienta de agricultura de precisión durante el periodo de zafra 2021-2022 en la empresa Central Azucarera Tempisque S.A. (CATSA) ubicada en Liberia, Guanacaste.

Para su desarrollo se estudió el comportamiento de cuatro índices de vegetación, el GNDVI, NDVI, MSI y NDMI y su relación con los rendimientos obtenidos a través del monitor de cosecha. A partir de las correlaciones realizadas se determinó que el MSI es el índice que mejor correlación posee; sin embargo, con los otros índices también se obtuvieron correlaciones certeras.

Cabe recalcar que para obtener buenos resultados se debe aplicar el modelo según la naturaleza del mismo; es decir, al tratarse de un modelo general para un conjunto de lotes su evaluación debe realizarse de la misma manera.

Palabras clave: agricultura de precisión, mapas de productividad, índices de vegetación, monitores de rendimiento, Sistemas de Información Geográfica, caña de azúcar.

ABSTRACT

Currently, and thanks to the technological advances, precision agriculture has had a constant growth within the production companies, such as Central Azucarera Tempisque S.A. As part of this growth, have been implemented technologies that allow to have production yields almost in real time.

Part of this project seeks to take advantage of the technologies available in the company, such as the harvest yield monitors, this way the main objective is to generate a correlation model and analysis of the yields of sugarcane crop through vegetation indices and yield maps for the creation of a precision agriculture tool during the harvest period 2021-2022 at Central Azucarera Tempisque S.A. (CATSA) located in Liberia, Guanacaste.

For its development, it was studied the behavior of four vegetation indices: GNDVI, NDVI, MSI and NDMI in relation to harvest yields, obtained through the harvest monitor. From the correlations made, it was determined that the MSI is the index that has the best correlation; however, accurate correlations can also be obtained from the other indices.

It should be emphasized that in order to have successful results, the model must be applied according to its nature, that is, since it is a general model for a group of fields, its evaluation must be done in the same way.

Key words: precision agriculture, yield mapping, vegetation index, harvest monitor, Geographic Information Systems, sugarcane.

1. INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar se ha caracterizado por ser una agroindustria tradicional de larga y rica historia, aunque con un destacado desarrollo tecnológico. Según el MAG (2007), citado por Alemán Montes et al. (2021), en Costa Rica, el cultivo de caña de azúcar es una actividad agrícola tradicional y de gran relevancia, no solo por aspectos económicos y sociales, sino también por su extensión en el país, así como los recursos naturales que demanda su producción.

La zona de mayor producción en el país se ubica en la región de Guanacaste donde se cosecha cerca de la mitad de la producción total nacional (Aguero Murillo, 2009) y donde destacan las tres empresas azucareras de mayor capacidad de procesamiento de materia prima y fabricación de azúcar del país: Azucarera El Viejo, CATSA e ingenio Taboga S.A.

Desde hace un tiempo, el incremento de los costos de producción ha motivado a que los ingenios azucareros busquen tecnologías que les permita hacer un mejor aprovechamiento de los recursos. De aquí surge el concepto y aplicación de la agricultura de precisión, la cual se basa en el manejo diferenciado de los cultivos utilizando diferentes herramientas tecnológicas, como la teledetección, que permiten caracterizar la variabilidad que tiene un lote agrícola y realizar una gestión integral del mismo (Cittadini et al., 2016). Actualmente, la evaluación del nivel productivo de la caña de azúcar se realiza al finalizar cada zafra y mediante estimaciones de rendimiento con anterioridad a la cosecha a través de observaciones de campo y muestreos. Sin embargo, los avances en agricultura de precisión hacen posible el monitoreo y la estimación del estado del cultivo (Zenteno Cruz et al., 2017).

Usualmente, la atención que se presta al procedimiento de estimación de rendimiento es escasa y, en muchos casos, la impresión subjetiva sobre la condición del cultivo juega un papel importante al asignar un valor probable al rendimiento de un lote. Por lo tanto, la construcción de una metodología eficaz de estimación de rendimiento contribuye a reducir errores en el proceso o a identificarlos, permitiendo una mejora continua y resultados que contribuyen a fortalecer la confianza entre los equipos técnicos u operativos y los tomadores de decisión de las empresas (Domínguez & Rodríguez, 2015). La necesidad de este tipo de metodologías no solo aplica para la caña de azúcar, sino también para otros cultivos, tal es el caso de la palma aceitera que Watson Hernández et al. (2022) desarrollaron y cuyo principal

objetivo fue predecir el rendimiento en lapsos de tiempo seguros para la gestión de la producción mediante el uso de imágenes satelitales de libre acceso.

De esta manera se pretende contribuir con el desarrollo del departamento de agricultura de precisión, brindándole a la empresa una herramienta metodológica y flexible que le permita realizar estimaciones más certeras sobre los rendimientos del cultivo para así tomar decisiones orientadas a las necesidades reales del cultivo y evitar el mal aprovechamiento de los insumos, hecho que toma gran importancia debido al alza en los precios de los mismos, todo esto basado en imágenes satelitales y los rendimientos obtenidos de los monitores de cosecha.

Así mismo, este proyecto busca ser el inicio en la creación de una base de datos mediante mapas de rendimiento que recolecten información de los lotes, apuntando a la incorporación de la agricultura 4.0, la cual busca analizar datos con la finalidad de mejorar la calidad de los cultivos y disminuir el daño ambiental sin comprometer la capacidad productiva.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Generar un modelo de correlación y análisis de los rendimientos del cultivo de caña de azúcar mediante índices de vegetación y mapas de rendimiento para la creación de una herramienta de agricultura de precisión durante el periodo de zafra 2021-2022 en la empresa Central Azucarera Tempisque S.A. (CATSA) ubicada en Liberia, Guanacaste.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Analizar la información brindada por el monitor de rendimiento mediante un post-procesamiento con el fin de filtrar la información y evitar errores en la correlación.
- b) Estimar la relación existente entre el rendimiento del cultivo de caña de azúcar y diferentes índices de vegetación mediante una correlación estadística para medir el grado de asociación entre ambas variables.
- c) Determinar los posibles beneficios que conlleva la implementación de dicho modelo para la empresa con vistas a un mejor aprovechamiento de los recursos.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 Caña de azúcar

La caña de azúcar (*Saccharum spp.*) es un cultivo cuyo origen se ubica en Polinesia, Asia, y fue introducida a América durante la conquista. Dicho cultivo se encuentra principalmente en las regiones tropicales y subtropicales del mundo, y la cuál además de presentar un alto crecimiento en condiciones adecuadas, cuenta con la habilidad de acumular altas concentraciones de sacarosa en los entrenudos del tallo (Kopper Sandoval, 2015). En el caso de Costa Rica, en la región de Guanacaste destacan las tres empresas azucareras de mayor capacidad de procesamiento de materia prima y fabricación de azúcar del país: Azucarera El Viejo, CATSA e ingenio Taboga (Angulo Marchena et al., 2020).

Entre las principales generalidades del cultivo, el Ministerio de Agricultura y Ganadería (1991) menciona que la temperatura ideal se encuentra entre los 27°C y los 38°C según la fase en la que se encuentre el cultivo. Así mismo, entre mayor sea la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas durante la maduración, mayor será la posibilidad de obtener jugos de alta pureza y un mayor rendimiento de azúcar.

En cuanto a la precipitación, la anual adecuada es de 1500 mm distribuida durante los nueve meses del periodo de crecimiento; sin embargo, durante el periodo de maduración debe reducirse la cantidad de agua para restringir el crecimiento y lograr el acumulo de sacarosa (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1991).

Con respecto a las variedades de la caña de azúcar, Angulo Marchena et al. (2020) mencionan que en Costa Rica existen ocho variedades comerciales; para el caso de este proyecto se trabajará con las variedades CP 72-2086, SP 81-3250 y Laica 00-301.

CP 72-2086

Es una variedad de muy amplio uso y floración moderada que en condiciones de estrés hídrico presenta corcho en los tallos. Presenta baja tolerancia a los herbicidas de uso comercial y en general manifiesta tolerancia media a las enfermedades, se adapta bien a suelos de textura media a gruesa con riego. Es una variedad de alta concentración de sacarosa, con buen rendimiento agrícola y responde bien a la cosecha mecánica. Es la variedad más cultivada en el país.

SP 81-3250

Al igual que la variedad anterior, posee una floración moderada y en condiciones de estrés hídrico presenta corcho en el tallo. Es tolerante a los herbicidas de uso comercial y muestra tolerancia a las enfermedades de la región. Se adapta bien a suelos de textura gruesa y media con riego. de concentración media de sacarosa, con buen rendimiento agrícola, se tiende a inclinar después de la primera soca, pero se adapta bien a la cosecha mecánica.

Laica 00-301

Se trata de una variedad nacional sin floración, con crecimiento y cierre de macollamiento lento. Presenta tolerancia media a los herbicidas comerciales y se adapta bien a suelos arcillosos y franco arcillosos con riego, manifiesta un poco de tolerancia al déficit hídrico. Su concentración de sacarosa es media, con rendimientos agrícola de alto tonelaje y se adapta bien a la cosecha mecánica.

3.1.1 Manejo del cultivo

3.1.1.1 Preparación y siembra

La caña de azúcar, al tratarse de un cultivo permanente requiere de una buena preparación del suelo, llegando a condiciones favorables mayores a los 50 cm de profundidad (Dolores Marcelo & Aldana Diestra, 2011). La preparación del suelo representa una labor básica, su principal objetivo radica en realizar una preparación conveniente y apropiada al suelo sin provocar excesos y destrucción de su estructura (Angulo Marchena et al., 2020).

Entre las principales labores de preparación Angulo Marchena et al. (2020) mencionan:

Limpieza y descepa

Se realiza con una rastra rompedora que permite remover y destruir las cepas viejas y el material vegetativo, incorporándolo al suelo para su descomposición. Por lo general se realiza con buena anticipación a la siembra.

Descompactado profundo

Es una práctica que se realiza con el objetivo de romper las capas más profundas, compactas e impermeables, con lo cual se mejora la oxigenación y el desarrollo del sistema radicular.

Rastra afinadora

Consiste en romper y reducir el tamaño de los terrones grandes que dificultan la calidad del surcado. Con esta labor se evita la formación de espacios de aire en el suelo, los cuales provocan la desecación de la semilla luego de sembrada.

Surcado

Consiste en el trazado de los surcos donde será colocada la semilla, la distancia entre surcos varía de acuerdo al manejo agronómico y tipo de cosecha, por lo general rondan los 1,5 m y 1,7 m.

Una vez finalizada la preparación del suelo se procede con la siembra de la plantación, la cual debe planificarse tomando en cuenta factores determinantes como lo es la disponibilidad de agua. En el caso de Guanacaste la siembra se realiza de manera manual o mecanizada (Angulo Marchena et al., 2020).

En el caso de la siembra manual, es el método más utilizado por los productores independientes y consiste en colocar los esquejes en el surco y taparlos. En cuanto a la siembra mecanizada, consiste en un equipo combinado integral que realiza simultáneamente las funciones de almacenaje de semilla, surcado, fertilización, siembra del esqueje y tapa el surco (Angulo Marchena et al., 2020).

Según estudios, la siembra mecanizada resulta más económica que la siembra convencional (manual), por lo tanto, existe una tendencia hacia la mecanización justificada por el menor costo de operación y el alto desempeño de las sembradoras, en un entorno donde falta mano de obra (Nova V, 2008).

3.1.1.2 Mantenimiento

Según Angulo Marchena et al. (2020), después de ocurrida la siembra o la cosecha, por lo general se establece una serie de labores que pueden variar según la época de siembra, las condiciones del suelo y la disponibilidad de agua, algunas de estas labores son:

Subsolado

Consiste en romper el suelo con el objetivo de mejorar algunas propiedades físicas del mismo, como la compactación, sin necesidad de romper las raíces viejas y mejorar la aireación.

Aplicación de fertilizantes

La caña de azúcar es una planta muy exigente en cuanto a demanda de nutrimentos requeridos, la aplicación de nitrógeno y otros nutrientes se realizan en una sola aplicación sin fraccionamiento, excepto en condiciones que lo ameriten y justifiquen el refuerzo, en estos casos se aplica una segunda fracción de nitrógeno y potasio.

Aporca y conformado

Se realiza posterior al paso del abonado y de la aplicación de herbicidas; su función principal es favorecer la proximidad del suelo en la sección lateral de la cepa, esto permite incorporar residuos vegetales, cubrir el fertilizante y efectuar un control físico de las malezas presentes. Además, orienta la conducción del agua de riego y los excesos de lluvia.

Aplicación de herbicidas

El manejo de malezas se realiza por medio del control químico. Los herbicidas pueden ser por su efecto pre emergentes y pos emergente, en el caso de los pre emergente estos se aplican inmediatamente después de sembrada y tapada la caña, aplicando un producto sellador al suelo que impide la nacencia y emergencia de malezas por un periodo de al menos 30 a 60 días.

Aplicación de madurante

Consiste en una aplicación química mediante el empleo de maduradores que actúan como reguladores de crecimiento, favoreciendo e incrementando el contenido Brix, Pol y Pureza (%) del jugo, y con ello inducen a una mayor concentración de sacarosa en los tallos.

El madurante se aplica de 5 a 6 semanas antes de cosechar y la dosis aplicada se estima de acuerdo con la variedad y el tonelaje estimado.

3.1.1.3 Cosecha

Una de las labores más importantes es la cosecha de la caña de azúcar, esta debe realizarse cuando la planta alcance la edad y madurez comercial óptimas que permitan asegurar una buena recuperación de azúcar. Además se debe tener especial cuidado en realizar un corte adecuado a nivel del suelo, un buen despunte y una eficiente limpieza de la materia extraña (Bolaños Porras & Oviedo Alfaro, 2006).

Existen tres tipos de cosecha: manual, semimecanizada y mecanizada en su totalidad. Bolaños Porras y Oviedo Alfaro (2006) las describen de la siguiente manera:

Cosecha Manual

Se lleva a cabo en regiones de topografía irregular y tanto el corte como el acomodo de los tallos en las carretas son hechas manualmente.

Cosecha semimecanizada

En esta modalidad, la corta de la caña se realiza de forma manual pero el alza de la caña mediante cargadoras mecánicas. Este tipo de cosecha depende mucho del acomodo de los tallos y la uniformidad del lote.

Cosecha mecanizada

La cosecha mecanizada se ha desarrollado de forma constante principalmente a causa de la necesidad de suplir la falta de mano de obra. Entre los principales beneficios de la cosecha mecánica se tiene la simplicidad y control de la operación de cosecha, la entrega de caña más fresca al ingenio, menor costo por tonelada cosechada, entre otras. Sin embargo, también presenta algunos efectos negativos como el deterioro de la cepa, mayores pérdidas por caña dejada en el campo y la necesidad de personal calificado para la operación.

En cuanto a las cosechadora de caña, Galvis Mantilla (s.f.) describe los principales sistemas que estas poseen:

- a. Sistema descogollador: se encuentra en la parte frontal de la máquina y está compuesto por un par de tambores que giran hacia adentro y van desmenuzando el tallo inmaduro (cogollo) y las hojas verdes.
- b. Sistema de tumbado: los divisores de cosecha introducen la caña hacia adentro de la máquina y levantan aquellas que están caídas hacia los lados.
- c. Sistema de corte basal: compuesto por dos platos y cuatro cuchillas, aquí se produce la calidad del corte de la cepa y la incorporación de materia extraña.
- d. Sistema de alimentación: compuesto por rodillos que tienen la función de introducir la caña dentro de la máquina para su posterior troceado.
- e. Sistema de troceado: es el encargado de picar la caña y el material extraño en trozos para que este último pueda ser extraído fácilmente.
- f. Sistema de cargue (elevador): es el conductor que lleva la caña al sitio más alto de la máquina para cargar los volteos.
- g. Sistema de limpieza: las cosechadoras cuentan con dos extractores, el primario se encuentra ubicado en la parte superior de la cosechadora y succiona la materia extraña para que sea expulsada nuevamente al campo. El extractor secundario es el último punto por el que pasa la caña antes de ser depositada en los volteos y algunos materiales pequeños son expulsados de nuevo al campo.

A modo de ejemplo, en la Figura 1 se presenta un diagrama con las partes de una cosechadora de caña de azúcar.

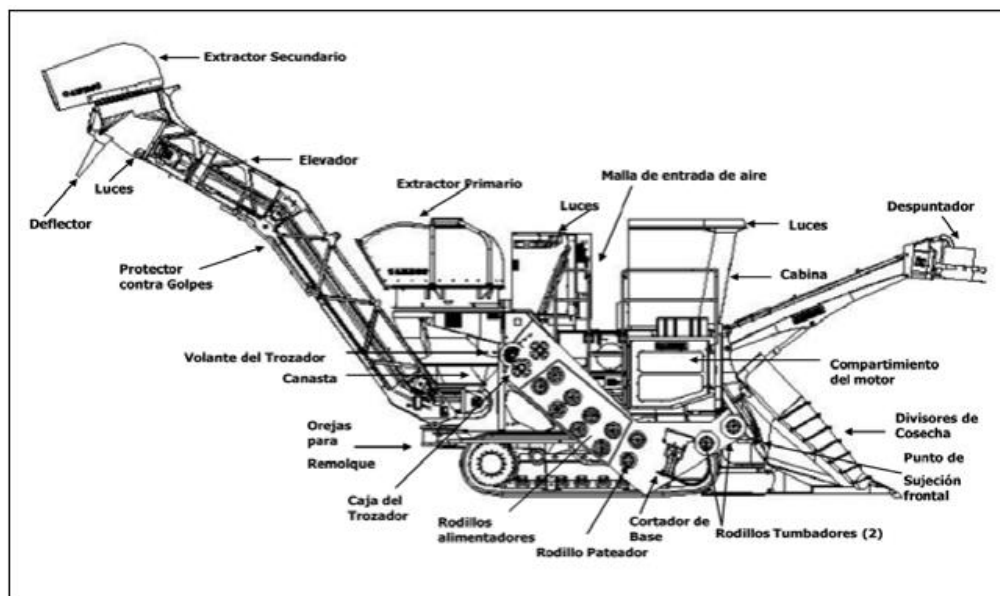


Figura 1. Diagrama de una cosechadora de caña, con sus diferentes sistemas.

Fuente: (Galvis Mantilla, s.f.)

3.1.2 Rendimientos

Según Kopper Sandoval (2015) los rendimientos productivos del cultivo de la caña de azúcar se encuentran estrechamente relacionados con las condiciones climáticas, manejo agronómico y edad de cosecha, siendo la última fase del desarrollo del cultivo en el que cesa la producción de materia verde y da paso a la acumulación de sacarosa en el tallo.

Las empresas agrícolas necesitan estimar los rendimientos previos a la cosecha para estimar ajustar sus estrategias comerciales y adecuar la logística de la postcosecha. Usualmente la atención que se presta al procedimiento de estimación de rendimiento es escasa y, en muchos casos la impresión subjetiva sobre la condición del cultivo juega un papel importante al asignarle un valor probable al rendimiento de un lote (Domínguez & Rodríguez, 2015).

A lo largo del tiempo se han desarrollado diversas metodologías que permitan realizar las estimaciones correspondientes, como es el caso de los muestreos en campo o a través del uso de las cosechadoras. En cuanto a los muestreos, estos constituyen una alternativa para la determinación de la biomasa existente al momento del muestreo; de esta manera, los resultados obtenidos son comparados con la producción real obtenida en romana. Chica et al. (2016) determinan en un estudio un modelo lineal para estimar el TCH (Tonelaje de Caña

por Hectárea) al momento de la cosecha, con una incertidumbre de +/- 7.8 TCH y en el que utilizan variable como el TCH (del muestro) y la raíz.

Con respecto a las cosechadoras, estas permiten medir el flujo de masa cosechada; para esto es necesario equipar la cosechadora de manera que sea posible generar mapas de rendimientos (Cerri & Graziano, 2005). Por tal razón es que continuamente se buscan tecnologías que permitan a la industria cuantificar o estimar dichos rendimientos, tal es el caso del uso de diferentes herramientas geoespaciales como las imágenes satelitales (Aleján Montes et al., 2021).

Una manera de estimar los rendimientos de la caña de azúcar es a través de los monitores de cosecha, los cuales recogen y analizan información importante de la cosecha, lo que permite a los productores tomar decisiones más inteligentes que reduzcan los costos de cosecha, tal es el caso del Harvest Monitor de John Deere (John Deere, 2018).

Este monitor de cosecha está compuesto por sensores ópticos de alta resolución que se usan para escanear el flujo de caña mientras pasa a través del elevador, identificando el volumen de caña y diferenciándolo de los residuos (Figura 2). Así mismo, cuentan con cuatro luces LED que iluminan la zona de muestreo para garantizar una claridad visual ininterrumpida.

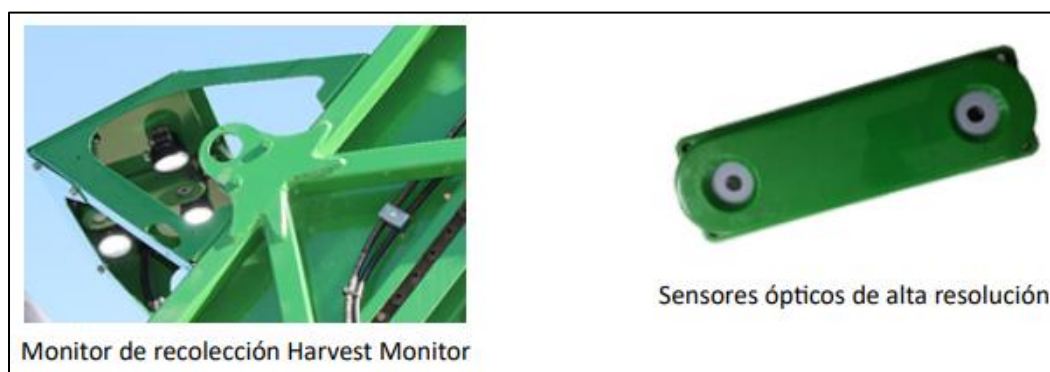


Figura 2. Monitor de cosecha y sensores ópticos.

Fuente: (John Deere, 2018).

Los puntos de datos se georreferencian para precisar las ubicaciones del campo y así poder generar una gran variedad de mapas informativos, para esto se requiere que las cosechadoras cuenten con el receptor GPS StarFire 6000, como el que se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Receptor StarFire 6000.

Fuente: (John Deere, 2018).

Mientras se cosecha, en la pantalla se muestra información de lo captado por el sensor; de esta manera, el operador desde la cabina puede monitorear las toneladas totales cosechadas, la productividad de las cosechadoras, el porcentaje de residuos y consumo de combustibles.

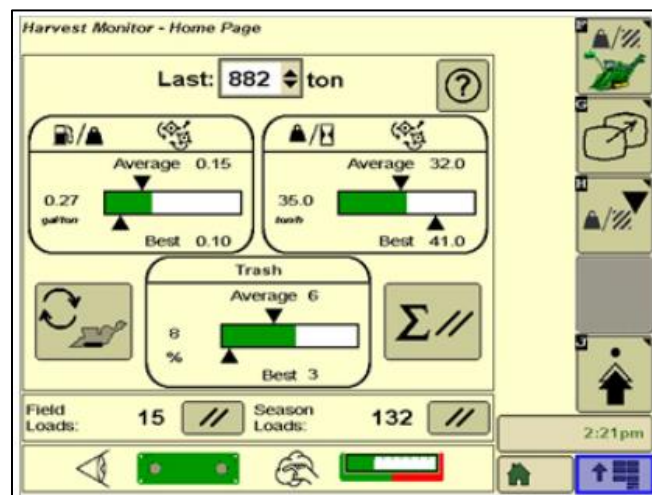


Figura 4. Vista de la pantalla, monitor de rendimiento.

Fuente: (John Deere, 2018).

Los datos del monitor se pueden procesar mediante el centro de operaciones John Deere para generar mapas e informes que ayudarán a optimizar las operaciones, algunos de los mapas que se pueden generar son variabilidad de rendimiento, consumo de combustible, materia extraña, entre otros.

En cuanto a la calibración, esta se puede realizar de manera automática entre la cosechadora y el volteo; sin embargo, se requiere de un equipo de comunicación inalámbrico entre ellos. Por otro lado, la calibración manual se puede realizar introduciendo la información de peso para la carga suministrada por romana, o bien se pueden calibrar los mapas usando los datos del informe de cierre de los lotes.

3.2 Agricultura de precisión

El concepto de agricultura de precisión se basa en aplicar la cantidad correcta de insumos en el momento adecuado y en el lugar exacto, es el uso de la tecnología de la información para adecuar el manejo de suelos y cultivos a la variabilidad presente dentro del lote. La agricultura de precisión también involucra el uso de sistemas de posicionamiento global y de otros medios electrónicos para obtener datos del cultivo (García & Flego, s.f.).

Según Gómez Calderón y Solórzano Quintana (2017), los primeros indicios en temas de agricultura de precisión datan desde 1920 con publicaciones sobre agricultura de tasa variable en pequeñas extensiones; sin embargo, la integración de la tecnología y el desarrollo de la agroindustria han propiciado un salto hacia la agricultura inteligente a partir del año 2000.

Cabe mencionar que, como lo dice la corporación Sugar Research Australia (2015) en su informe, la agricultura de precisión no se reduce solo al uso de GPS y otras tecnologías, sino que se trata de un proceso que debe ser parte de un plan de manejo por parte de los agricultores, dicho proceso consiste en:

- a) Reconocer la oportunidad de mejorar el manejo de la variabilidad de un campo.
- b) Recolectar información espacial en alta resolución.
- c) Unir toda la información y analizarla (a través de un GIS por ejemplo).
- d) Crear un plan de manejo que oriente la variabilidad de los suelos, potencial del cultivo o cualquier otro factor que se considere importante.
- e) Evaluar el manejo llevado a cabo para determinar si se obtuvieron los resultados deseados, si continuar recolectando información y, de ser necesario, ajustar el plan de manejo.

Siguiendo este proceso, Díaz García (2015) señala algunas aplicaciones concretas que se pueden llevar a cabo como lo son la detección del estado hídrico de las plantas, detección de estrés nutricional en cultivos, detección temprana de enfermedades y plagas, monitoreo del estado de los cultivos, monitoreo del rendimiento, índices relativos a la calidad de los cultivos, entre otros. En la Figura 5 se ejemplifican algunas de las aplicaciones de la agricultura de precisión.

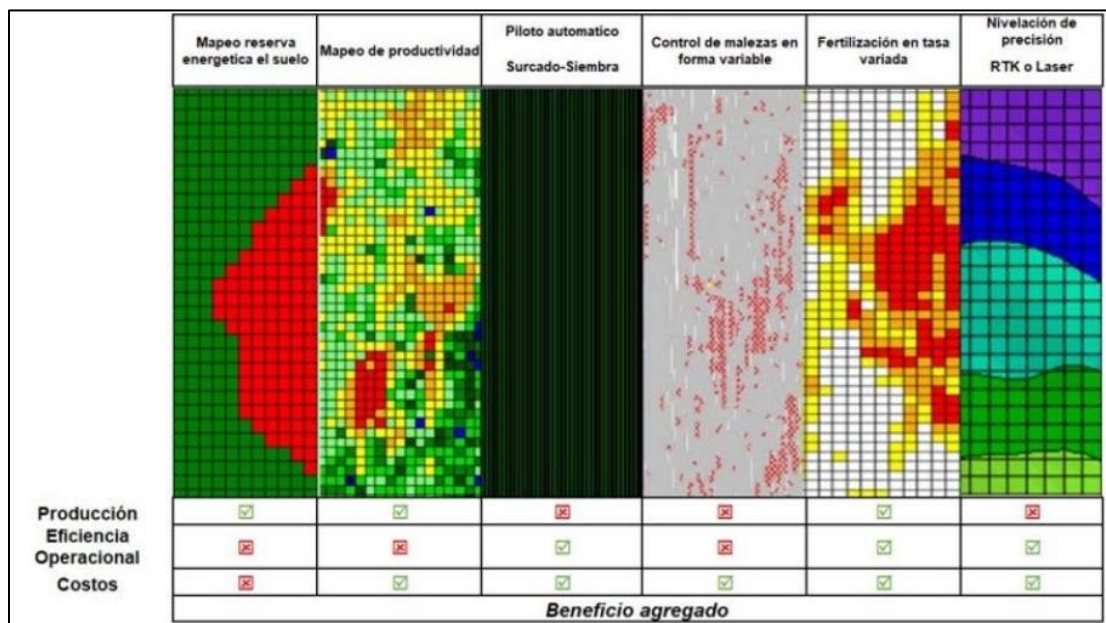


Figura 5. Ejemplos aplicaciones de Agricultura de Precisión.

Fuente: (Mosquera, 2010).

Según Bongiovanni & Vicini (2008), el monitor de rendimiento es la herramienta más difundida en agricultura de precisión, lo que permite obtener datos precisos del cultivo para confeccionar mapas de rendimiento y así atender adecuadamente las necesidades específicas del cultivo en un determinado lote y que se encuentra bajo ciertas condiciones.

3.3 Fuentes de información en agricultura de precisión

Según Chartuni, de Carvalho Pinto y de Queiroz (2006), citado por Romero Calvo (2017), son la ciencia agronómica y la de la ingeniería agrícola las disciplinas a las que les compete la ejecución de la agricultura de precisión. En el caso de la ingeniería agrícola se refiere a la evolución de las máquinas agrícolas, uso de sensores, sistemas de posicionamiento global y recolección remota de datos. El avance tecnológico contribuye con

el desarrollo en la agricultura y en este caso se puede mencionar la teledetección como una herramienta práctica en la detección de cultivos, así como los monitores de rendimiento y los muestreos en campo (Hernández Camacho, 2018).

Por otro lado, la línea agronómica se refiere a los trabajos que se realizan en el campo usando técnicas de investigación basados en el estudio de la variabilidad del sistema suelo-agua-planta mediante el muestreo de suelos, fotografías de las áreas estudiadas y análisis del cultivo.

3.3.1 Teledetección

La teledetección es la técnica de adquisición de datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales. La interacción electromagnética entre el terreno y el sensor genera una serie de datos que son procesados posteriormente para obtener información interpretable de la Tierra (Instituto Geográfico Nacional, s.f.).

Para entender la percepción remota es necesario comprender el concepto de longitud de onda y frecuencia. La longitud de onda se refiere a la distancia entre dos picos de la onda sinusoidal, y la frecuencia corresponde a la cantidad de picos de onda pasando por un punto determinado del espacio por unidad de tiempo (Campos Vargas, 2010).

3.3.1.1 Espectro electromagnético

Es el conjunto de longitudes de onda de todas las radiaciones electromagnéticas y se refiere a la radiación que emite o absorbe un objeto. Dicho espectro se extiende desde la radiación de menor longitud de onda (rayos gamma y rayos X), radiación ultravioleta, luz visible y radiación de onda, hasta ondas de mayor longitud como ondas de radio; cada una de estas se conocen como bandas del espectro electromagnético (Campos Vargas, 2010). En la Figura 6 se muestra gráficamente las bandas del espectro con sus respectivas longitudes de onda. Para este proyecto son de interés el espectro visible y el infrarrojo cercano.

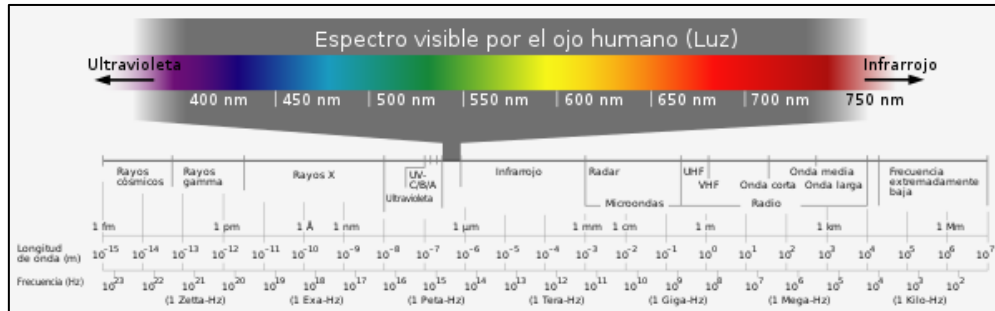


Figura 6. Espectro electromagnético.

Fuente: (Campos Vargas, 2010).

El espectro visible corresponde a las longitudes de onda que pueden ser percibidas por el ojo humano y equivale a los colores primarios (azul, rojo, verde) y sus combinaciones. Por otro lado, el infrarrojo cercano no puede ser percibido por el ojo humano pero es útil para discriminar diferentes concentraciones de humedad, ya sea en el suelo o en la vegetación (Campos Vargas, 2010).

3.3.1.2 Sensores remotos

Los sensores remotos son una parte de la agricultura de precisión, específicamente de la teledetección, puesto que son el sistema o instrumento que permite captar la información de un objeto a distancia; usualmente dicha información es presentada por medio de imágenes. Estas imágenes son recopiladas en formato digital y pueden ser almacenadas en capas que representan diferentes longitudes de onda, las más comunes incluyen las longitudes o bandas azul, rojo, verde e infrarrojo cercano (NIR) que en diferentes combinaciones son usadas para destacar diversos aspectos físicos del cultivo (Sugar Research Australia, 2015).

Las imágenes para la teledetección suelen ser obtenidas de satélites, drones o sensores de proximidad. En el caso de los satélites, debido a que estos se encuentran constantemente orbitando alrededor de la Tierra, las imágenes van a estar disponibles solo en el momento en el que el satélite pasa sobre el área de interés; así mismo, la calidad de las imágenes dependerá de factores como la presencia de nubes (Sugar Research Australia, 2015).

Satélite Landsat

Landsat corresponde a una serie de satélites construidos y puestos en órbita por parte de la NASA en Estado Unidos. El primer satélite (Landsat 1) fue lanzado en 1972 y el más reciente fue puesto en órbita en el 2021 (NASA, s.f.).

En el caso de Landsat 8, este posee dos instrumentos de medición: la Imagen de Tierra Operacional (OLI), el cual tiene una resolución espacial de 15 metros en la banda pancromático y 30 metros en las bandas multispectrales, y el Sensor de Infrarrojos Térmicos (TIRS), que mide la temperatura de la superficie terrestre mediante dos bandas del infrarrojo térmico con una resolución espacial de 100 metros.

En el Cuadro 1, se presenta información según las bandas para el uso de las imágenes Landsat 8.

Cuadro 1. Información satélite Landsat 8.

Bandas	Resolución	Descripción	Longitud de onda (μm)
Band 1	30 m	Coastal / Aerosol	0.435 – 0.451
Band 2	30 m	Azul	0.452 – 0.512
Band 3	30 m	Verde	0.533 – 0.590
Band 4	30 m	Rojo	0.636 – 0.673
Band 5	30 m	Infrarrojo cercano (NIR)	0.851 – 0.879
Band 6	30 m	Infrarrojo de onda corta (SWIR-1)	1.566 – 1.651
Band 7	30 m	Infrarrojo de onda corta (SWIR-2)	2.107 – 2.294
Band 8	15 m	Pancromático (Pan)	0.503 – 0.676
Band 9	30 m	Cirrus	1.363 – 1.384
Band 10	100 m	Sensor infrarrojo térmico (TIR-1)	10.60 – 11.19
Band 11	100 m	Sensor infrarrojo térmico (TIR-2)	11.50 – 12.51

Fuente: (NASA, s.f.)

Satélite Sentinel

Sentinel 2 es una misión de imágenes multispectrales de alta resolución administrado por la Agencia Espacial Europea para el monitoreo de la Tierra y consta de dos satélites: Sentinel 2A, lanzado en el 2015, y Sentinel 2B, lanzado en el 2017. Al contar con dos satélites se tiene la posibilidad de monitorear la superficie terrestre cada cinco días en condiciones sin nubes (European Space Agency, s.f.).

Según Bustos y Gonzaba (2017), citado por Loría Solano (2018), este satélite posee un instrumento óptico que presenta trece bandas espectrales: cuatro bandas con una resolución espacial de 10 metros, seis bandas con una resolución espacial de 20 metros y tres bandas con una resolución espacial de 60 metros .

En el Cuadro 2, se presenta información según las bandas para el uso de las imágenes Sentinel 2.

Cuadro 2. Información satélite Sentinel 2.

Bandas	Descripción	Longitud de la onda central (μm)	Resolución (m)
B1	Coastal Aerosol	0,443	60
B2	Blue	0,490	10
B3	Green	0,560	10
B4	Red	0,665	10
B5	Vegetation Red Edge	0,705	20
B6	Vegetation Red Edge	0,740	20
B7	Vegetation Red Edge	0,783	20
B8	NIR	0,842	10
B8A	Narrow NIR	0,865	20
B9	Water Vapor	0,945	60
B10	SWIR - Cirrus	1,375	60
B11	SWIR	1,610	20
B12	SWIR	2,190	20

Fuente: (Serrano Núñez et al., 2022)

3.3.1.3 Uso de sensores en el ámbito agrícola

En la agricultura, los sensores remotos se utilizan principalmente en el monitoreo detallado de los cultivos a través de los índices de vegetación. Según la Sugar Research Australia (2015) estos índices pueden utilizarse de muchas maneras y en diferentes momentos del ciclo del cultivo, algunos de sus usos son:

- Estimar el rendimiento de los cultivos.
- Detección de enfermedades.
- Identificar la cobertura de plagas y malezas.
- Evaluación de la uniformidad de riego.

- Observar cambios en el crecimiento de las plantas a lo largo del tiempo.
- Determinar la ubicación y el alcance del estrés del cultivo.

Dado que la caña de azúcar es un cultivo que no puede observarse fácilmente después de que alcanza cierta altura, los sensores remotos son una herramienta de gran utilidad para el manejo del mismo ya que no requiere estar en contacto con el cultivo. Adicionalmente, algunos problemas pueden ser identificados remotamente antes de ser identificados en el campo (Sugar Research Australia, 2015).

3.3.1.4 Índices de vegetación

Tal y como se mencionó anteriormente, los índices de vegetación permiten llevar a cabo un monitoreo detallado de los cultivos. Según Hogg (2004), citado por Alemán Montes (2020), con análisis espectrales se ha logrado evaluar de forma indirecta características de la vegetación como el contenido de clorofila, humedad de las plantas, variaciones en diferentes condiciones de estrés, entre otras; de esta manera, los sensores satelitales pueden medir la vegetación a partir de las modificaciones en la reflectividad de las plantas.

Con la combinación de los distintos rangos espectrales o bandas es posible medir indirectamente las propiedades físicas mencionadas anteriormente, todo esto por medio de los índices de vegetación; a continuación, se describen algunos índices que han sido usados en estudios relacionados al cultivo de caña de azúcar.

Índice Normalizado Diferencial de Vegetación

El NDVI es el más conocido y usado, fue introducido con el objetivo de separar la vegetación del brillo que produce el suelo. Este índice está relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas; de esta manera, los valores altos representan vegetación sana, mientras que valores bajos representan cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés, ya sea por presencia de plagas o sequía, la presencia de agua en la planta disminuye, por lo que la reflectividad también disminuye (Díaz García, 2015).

A continuación, se presenta la combinación de bandas necesaria para el cálculo del NDVI:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde

El GNDVI es una variante del NDVI que utiliza la banda verde en lugar de la roja. Este índice es más sensible a la concentración de clorofila que el NDVI, usualmente es empleado para determinar el consumo de agua y nitrógeno de la cubierta vegetal (Díaz García, 2015).

A continuación, se presenta la combinación de bandas necesaria para el cálculo del GNDVI:

$$GNDVI = \frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN}$$

Índice de Humedad de Diferencia Normalizada

El NDMI detecta los niveles de humedad en la vegetación y puede detectar el estrés hídrico en una fase tempranas. Entre sus principales usos se encuentran monitorear el contenido de agua en los cultivos y determinar las zonas del campo con estrés hídrico (NASA, s.f.).

A continuación, se presenta la combinación de bandas necesaria para el cálculo del NDMI:

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

Índice de Estrés por humedad

El MSI es una medida de reflectancia que es sensible al aumentar el contenido de agua en la hoja, de esta manera, los valores más altos indican un mayor estrés hídrico y por lo tanto un menor contenido de agua. Entre sus aplicaciones se encuentra el análisis del estrés del dosel, la predicción de la productividad, entre otros (Villatoro, 2021).

A continuación, se presenta la combinación de bandas necesaria para el cálculo del MSI:

$$MSI = \frac{SWIR}{NIR}$$

3.3.2 Monitoreo de rendimiento

El rendimiento agrícola resume el resultado de todo el ciclo de producción del cultivo, por lo que su censado y mapeo brindan la posibilidad de conocer cómo fue su variabilidad sobre el terreno y ofrecen la posibilidad de manejarlo. Los mapas de rendimiento son la herramienta más utilizada para monitorear el rendimiento del cultivo, con la elaboración de estos mapas, y una vez obtenido el rendimiento de cada punto, se pueden aplicar distintas estrategias de manejo como lo es la dosis variable de pesticidas, abonos, fertilizantes, etc (Lago et al., 2011).

Así mismo, también se han desarrollado herramientas que permiten conocer el estado del cultivo con suficiente anticipación para la toma de decisiones, y es que la estimación de la producción agrícola es necesaria para la planificación que deben realizar los productores. En estos casos se suele hacer uso de datos satelitales y datos de rendimientos históricos, con el fin de correlacionar esta información y generar un modelo que permita realizar una estimación más certera (Bocco et al., 2015).

3.3.3 Muestreos de campo

En el ámbito agrícola es indispensable saber cuándo aparece y cómo evoluciona un problema fitosanitario para llevar a cabo estrategias de manejo efectivas que dañen menos al ambiente y que repercutan en lo mínimo al rendimiento y calidad del cultivo. La decisión de qué tipo de medida emplear dependerá del umbral y del nivel de daño económico, para esto se debe realizar un adecuado monitoreo que permita dar un panorama real del nivel de infección o infestación del patógeno (Intagri, s.f.).

Algunos de los métodos de muestreo comúnmente utilizados para el monitoreo de enfermedades son los monitoreos en estaciones o grupos de plantas y los muestreos al azar; en el caso de las plagas, suelen utilizarse algunos tipos de trampas como lo son las trampas amarillas y azules y las trampas con feromonas (Intagri, s.f.). En relación con los suelos, los muestreos son usados más comúnmente para medir los niveles freáticos, estructura y composición química del mismo.

3.4 Tratamiento de la información

El análisis espacial requiere del uso de ciertas herramientas que permitan realizar un adecuado procesamiento de los datos para su posterior análisis. A continuación, se describen algunos conceptos básicos y herramientas para el tratamiento de la información.

3.4.1 Datos espaciales

Los datos geoespaciales son entidades espacio-temporales que cuantifican la distribución, estado y vínculos de los fenómenos u objetos naturales y sociales, se caracterizan por tener: posición absoluta (sobre un sistema de coordenadas), posición relativa (topología), figura geométrica (punto, línea, polígono) y atributos que lo describen (López López & Torres Gómez, s.f.).

Así mismo, López López & Torres Gómez (s.f.) describen tres componentes de los datos espaciales que hacen referencia a su localización, atributos y tiempo:

Componente espacial

Está ligado a la posición dentro de un sistema de referencia establecido, esta componente hace que la información pueda calificarse como geográfica.

Componente temática

Está relacionada con los atributos con lo que se representa en el mundo real, cada objeto puede registrar un determinado valor para sus atributos, los cuales pueden presentar irregularidad en el espacio y tiempo.

Componente temporal

La dimensión temporal es un aspecto importante que considerar ya que supone la necesidad de almacenar y tratar grandes volúmenes de datos.

En cuanto al formato que presentan los datos espaciales se tienen dos tipos: vectorial y raster. Al modelo vectorial lo constituyen elementos como puntos, líneas y polígonos, los cuales implican el posicionamiento relativo de los mismos en el espacio (Cocero Matesanz & Santos Preciado, s.f.).

En el modelo raster, el espacio está dividido en celdas o píxeles, de manera que la información queda reflejada sobre cada una de estas celdas y estructura la información individualmente para cada uno de los atributos en capas independientes; sin embargo, presenta el inconveniente de la cantidad de objetos espaciales que se derivan de este tipo de subdivisión espacial, lo que genera que sean archivos muy pesados (Cocero Matesanz & Santos Preciado, s.f.).

Los datos raster se pueden obtener de varias formas, las más comunes son la fotografía aérea y la imagen de satélite; sin embargo, también pueden ser calculados a partir de información recolectada anteriormente o generados a partir de datos vectoriales.

Seguido a este surge el concepto de análisis espacial, el cual, según Madrid & Ortíz (s.f.), se centra en el estudio de manera separada de los componentes del espacio, definiendo sus elementos constitutivos y la manera como éstos se comportan bajo ciertas condiciones. Para esto se utilizan diversas herramientas para encontrar en los resultados las relaciones adecuadas para una visión integral.

3.4.2 Sistemas de información geográfica

Según Ortiz (2001), citado por Campos Vargas (2010), los sistemas de información geográfica (SIG) se definen como el conjunto de procesamientos, equipos y programas de computación utilizados para la recolección, pre-procesamiento, almacenamiento y análisis de datos geográficamente referenciados.

En el caso de la agricultura de precisión, dado que la mayoría de los datos están relacionados a una localidad en específico, el uso de sistemas de información geográfica se vuelve la manera más efectiva que manejar la información espacial y a realizar su respectivo análisis (Sugar Research Australia, 2015).

Usualmente, en la agricultura, los productores conocen por experiencia la variabilidad que presentan sus campos; sin embargo, con el uso de SIG es posible llevar un registro temporal del comportamiento de dichos campos, así como tomar acciones conforme a la variabilidad del mismo campo, un ejemplo de esto es la capacidad del SIG de generar mapas de prescripciones para diversas actividades como lo son la aplicación de dosis variable de

fertilizantes. Cabe destacar que la calidad de la información generada dependerá de la calidad de la información obtenida e introducida al programa (Sugar Research Australia, 2015).

3.4.3 Correlación estadística e índices de correlación

Villón Bejar (2006) define la correlación estadística como “la asociación entre dos o más variables aleatorias, que explica solo parcialmente la variación total de una variable, por la variación de otras variables aleatorias involucradas en la ecuación de asociación”. Es decir, la correlación estadística expresa hasta qué punto dos variables están relacionadas y como una afecta a la otra.

Para determinar el grado de asociación de las dos variables, es necesario llevar a cabo un análisis de regresión y un análisis de correlación, el cual consiste en la realización de pruebas para determinar si es aceptable el grado de asociación correlativa (Villón Bejar, 2006).

Según Di Rienzo et al. (2005), el análisis de regresión estudia la relación funcional que existe entre dos o más variables; identifica el modelo que liga las variables, estima sus parámetros y, eventualmente, prueba hipótesis que hay entre ellos. Por otro lado, el análisis de correlación estudia el grado y sentido de asociación que hay entre el conjunto de variables, pero no se identifica ni se estima un modelo funcional para las variables.

Existen diversos modelos para realizar el análisis de regresión, la complejidad y la adecuación del mismo dependerá de cuanto se conoce acerca del proceso o fenómeno que se está tratando. Los modelos se pueden agrupar en lineales y no lineales, y dado la naturaleza del proyecto, en la que se consideran como variables el rendimiento del cultivo y los índices de vegetación, se recomienda la aplicación de un análisis de regresión lineal simple (Di Rienzo et al., 2005).

Cuando se trabaja con dos variables, se cuantifica la intensidad de la relación lineal que existe entre las dos variables mediante el coeficiente de correlación (R). Los valores de este coeficiente se encuentran entre -1 y 1; por lo tanto, los valores de -1 y 1 representan una correlación “perfecta”, de esta manera, en un análisis estadístico siempre se busca que el coeficiente de correlación sea lo más cercano a 1 posible (Di Rienzo et al., 2005).

3.5 Generación de productos

Toda la información recolectada debe usarse en la generación de productos, los cuales a través de un análisis llegan a brindar información valiosa. En este caso los productos generados se van a presentar como mapas de rendimientos, los índices de vegetación y zonas de manejo.

3.5.1 Mapas de rendimiento

Los mapas de rendimiento son imágenes geo-referenciadas con una escala de colores que indican el rendimiento de un punto en específico. Como se muestra en la Figura 7, el proceso para generar mapas de rendimiento consta de tres etapas: recolección de datos, procesamiento y salidas o reportes (Lago et al., 2011).

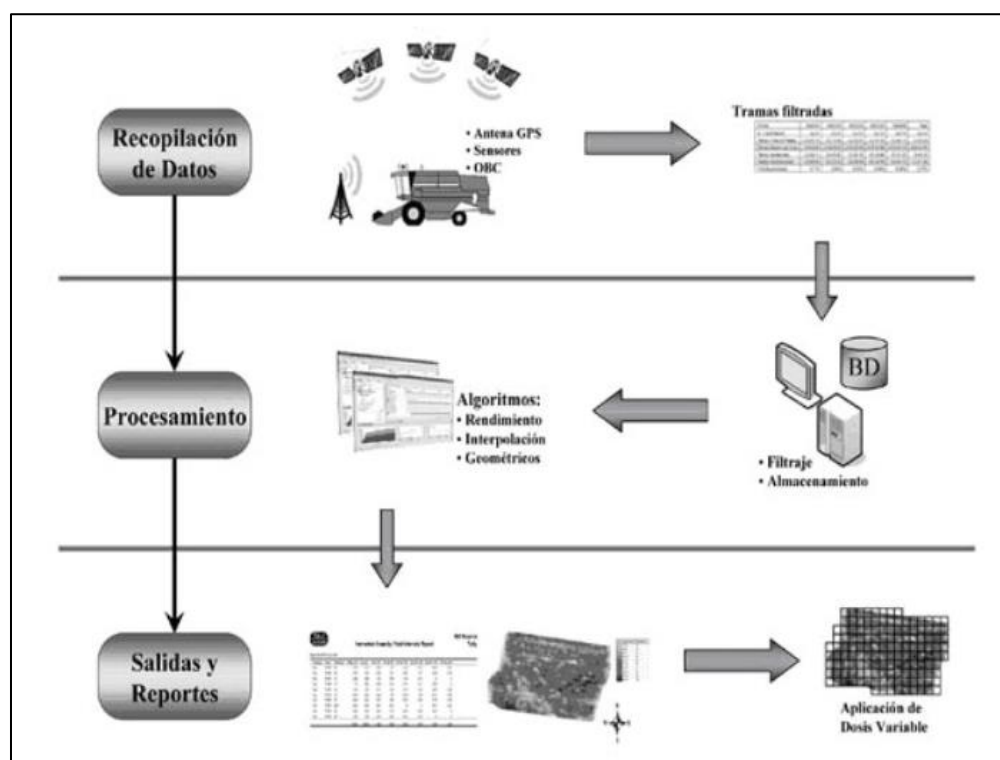


Figura 7. Proceso para generar mapas de rendimiento.

Fuente: (Lago et al., 2011).

La recolección de datos, como su nombre lo indica consiste en recolectar los datos generados por las cosechadoras, así como un filtrado de los mismos. En el caso del procesamiento, en esta etapa se llevan a cabo distintos procesos sobre los datos almacenados,

como algoritmos de rendimientos, interpolación, correlación de la información, entre otros, con el fin de que la información pueda ser interpretada posteriormente. Finalmente, en la etapa de salidas y reportes, corresponde propiamente a la generación e interpretación de los mapas, así como la recomendación de diversas formas de manejo que se le pueden dar al cultivo.

3.5.2 Índices de vegetación

Como se mencionó anteriormente, un índice de vegetación es el resultado de una fórmula que utiliza uno o varias bandas del espectro electromagnético. La relación de estas bandas demuestra la relación directa entre el valor numérico captado por el sensor y la variable de la planta a medir (Ruiz, 2018). Esta relación permite llevar un seguimiento del cultivo durante todo su ciclo de crecimiento y a partir de esto detectar ciertos patógenos que pueden estar afectando al mismo.

Según sea el índice con el que se trabaje, así será la representación de cada valor numérico; en el caso del NDVI, valores cercanos a 1 representan que existe más vigorosidad en la vegetación y cubierta vegetal, valores cercanos a 0 corresponden a zonas con muy poca vegetación y los valores negativos están asociados a suelos desnudos, nubes, agua, entre otros. El GNDVI, al igual que el NDVI, los valores oscilan entre -1 y 1, donde los valores entre -1 y 0 están asociados a la presencia de agua o suelo desnudo (Auravant, s.f.).

Con respecto al NDMI, este toma valores entre -1 y 1 donde los valores más altos (cercaos a 1) representan zonas con anegamiento, mientras que los valores cercanos a -1 representan condiciones de estrés hídrico y según sea el caso existen clasificaciones más específicas (NASA, s.f.).

Finalmente, en el MSI se invierte la interpretación con otros índices, de manera que los valores más altos indican un mayor estrés hídrico en las plantas. Los valores de este índice van de 0 a más de 3, siendo el rango para la vegetación verde de 0.4 a 2 (Villatoro, 2021).

3.5.3 Zonas de manejo

Tras la correlación entre los mapas de rendimientos y los índices de vegetación es posible obtener nuevos mapas con zonas de manejo diferenciadas; sin embargo, para esto se deben tomar en cuenta factores como condiciones de crecimiento, variedad de las plantas,

clima, tipo de suelo y otros factores que afecten la reflectancia de las imágenes. Los mapas resultantes pueden utilizarse para gran variedad de propósitos. En algunos casos estos suelen ser más útiles para comparar zonas de alto y bajo rendimiento que para el propio cálculo de lo real cosechado en toneladas de caña por hectárea (Sugar Research Australia, 2015).

En caña de azúcar, el uso más común de mapas de rendimientos obtenidos por teledetección han sido pronosticar el rendimiento, así como para la planificación de cosecha y evaluaciones visuales; sin embargo, algunos productores han podido usar estos mapas para practicas más avanzadas como por ejemplo el desarrollo de dosis variable (Sugar Research Australia, 2015). Para esto es necesario desarrollar zonas de manejo, en las que el tratamiento que se le da a cada una de estas sea de acuerdo a las condiciones físicas y químicas que presentan, en la Figura 8 se ejemplifica un mapa con las zonas de manejo según el rendimiento de cosecha.

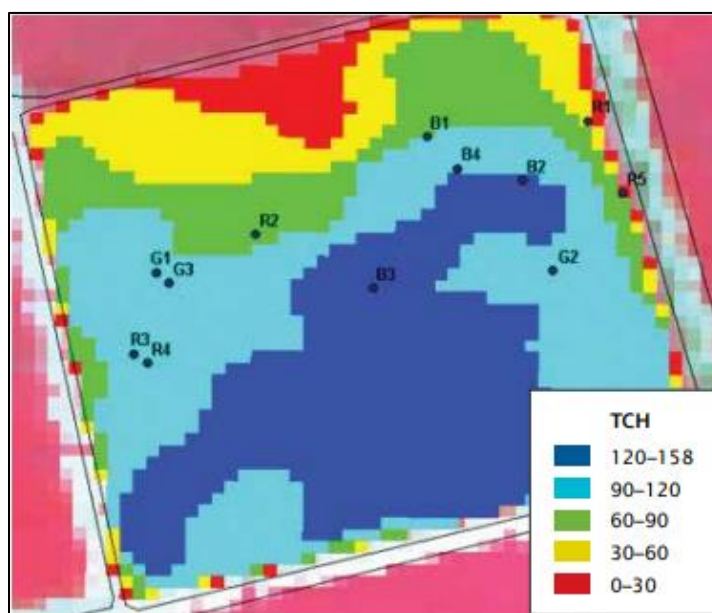


Figura 8. Ejemplo de zonas de manejo según toneladas cosechadas.

Fuente: (Sugar Research Australia, 2015).

Cabe recalcar que antes de realizar un manejo diferenciado se debe analizar que factor ocasiona dicho comportamiento para así tratar cada zona de manera adecuada.

Como se comentó anteriormente, los mapas pueden ser producidos a partir de los datos dados por el monitor de rendimiento o a partir de imágenes satelitales, estos últimos proporcionan una buena alternativa a los datos del monitor de rendimiento como lo es el

pronóstico de rendimiento a gran escala o en lugares donde los datos del monitor de rendimiento no están disponibles (Sugar Research Australia, 2015).

3.6 Viabilidad económica

Según Satorra (2018), existen varios métodos para comenzar a implementar la agricultura de precisión a nivel comercial de manera rentable; sin embargo, todos requieren una inversión inicial, ya sea en equipos, servicios de consultoría, capacitación o tiempo. Cualquiera que sea la solución adaptada, debe asegurarse de que sean viables, confiables y rentables, para lo cual es necesario estimar los beneficios en la producción.

El monitoreo del rendimiento mediante el mapeo tiene un alto potencial de contribuir en la nivelación de las zonas de baja producción y de explotar aún más las zonas con buenos rendimientos, además de permitir el diagnóstico de enfermedades, pestes, problemas de drenaje y fertilidad o diferencias en los sistemas de labranza mediante el seguimiento de las zonas de baja producción. Con el fin de obtener todos estos beneficios, Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer (2006), citados por Romero Calvo (2017), proponen una metodología para el cambio de margen, que consiste en el aporte de ingresos por concepto de la implementación de algunas de las técnicas de agricultura de precisión y que puede ser estimado por hectárea o para todo un lote de la siguiente manera:

$$\text{Cambio en el margen} = \text{cambio en ingresos} - \text{cambio en costos}$$

Normalmente, la implementación de herramientas de agricultura de precisión supone una gran inversión para los productores con el fin de lograr ciertos resultados; además de que tienen como propósito poder generar ganancias o beneficios adicionales. Para estos proyectos de inversión existen ciertos criterios como lo son el valor actual neto (VAN) y el tiempo de retorno (TIR) que permiten predecir la viabilidad del mismo.

Según menciona Romero Calvo (2017) el VAN es un indicador financiero que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja. Sapag (2011) lo define como el excedente resultante después de obtener la rentabilidad deseada o exigida después de recuperar la inversión. Cuando el VAN es mayor a cero, se mostrará cuánto se gana con el proyecto después de recuperar la inversión; si el resultado es igual a cero, indica que el proyecto reporta exactamente la tasa que se quería obtener después de recuperar la

inversión; y cuando el VAN es negativo muestra el monto que falta para ganar la tasa que se desea obtener. En cuanto al TIR, Sapag (2011) indica que mide la rentabilidad del proyecto en el tiempo.

4. METODOLOGÍA

4.1 Área de estudio

El presente proyecto se desarrolló en el ingenio Central Azucarera Tempisque S.A. ubicado en el cantón de Liberia, Guanacaste y cuenta con aproximadamente 9000 ha sembradas en caña de azúcar. Dicha área se encuentra dividida en 47 fincas, distribuidas entre el llamado casco central (zona continua al ingenio) y la zona norte del cantón. En la Figura 9 y 10 se muestran dos mapas del ingenio, tanto del casco central como de las fincas en la zona norte.

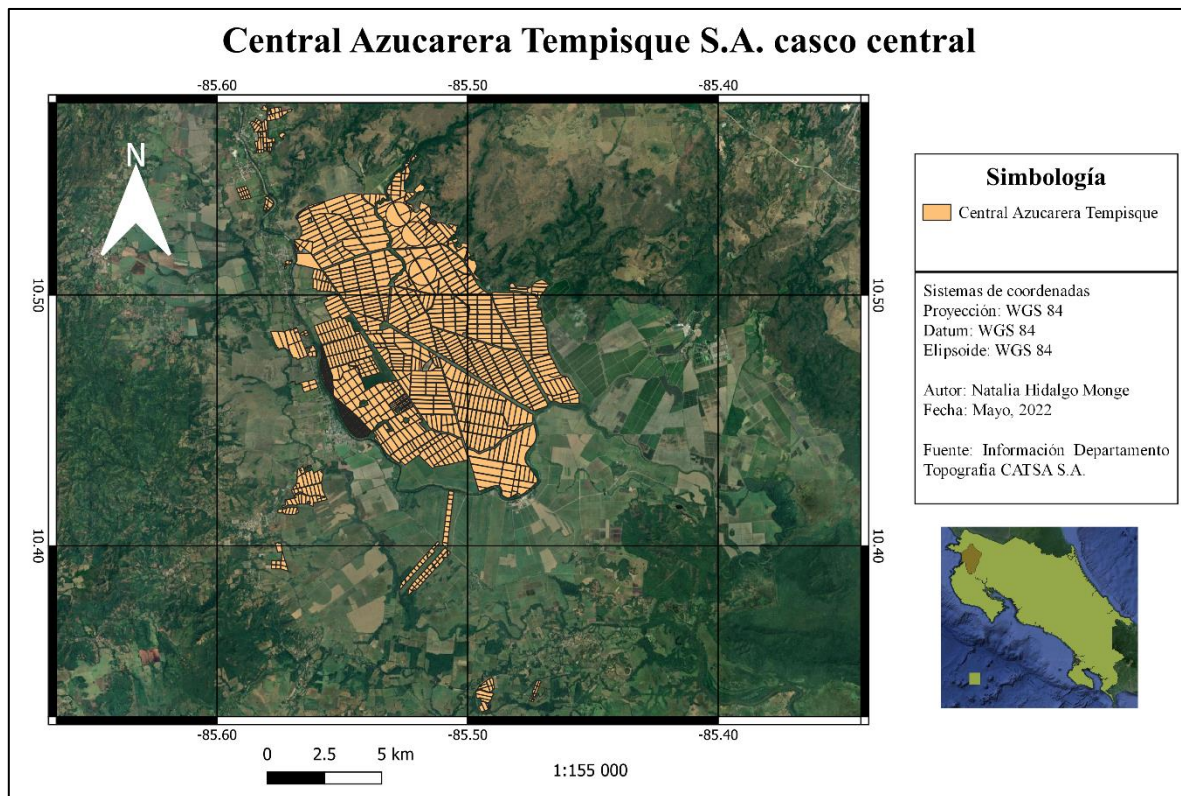


Figura 9. Mapa Central Azucarera Tempisque S.A. zona Casco Central.

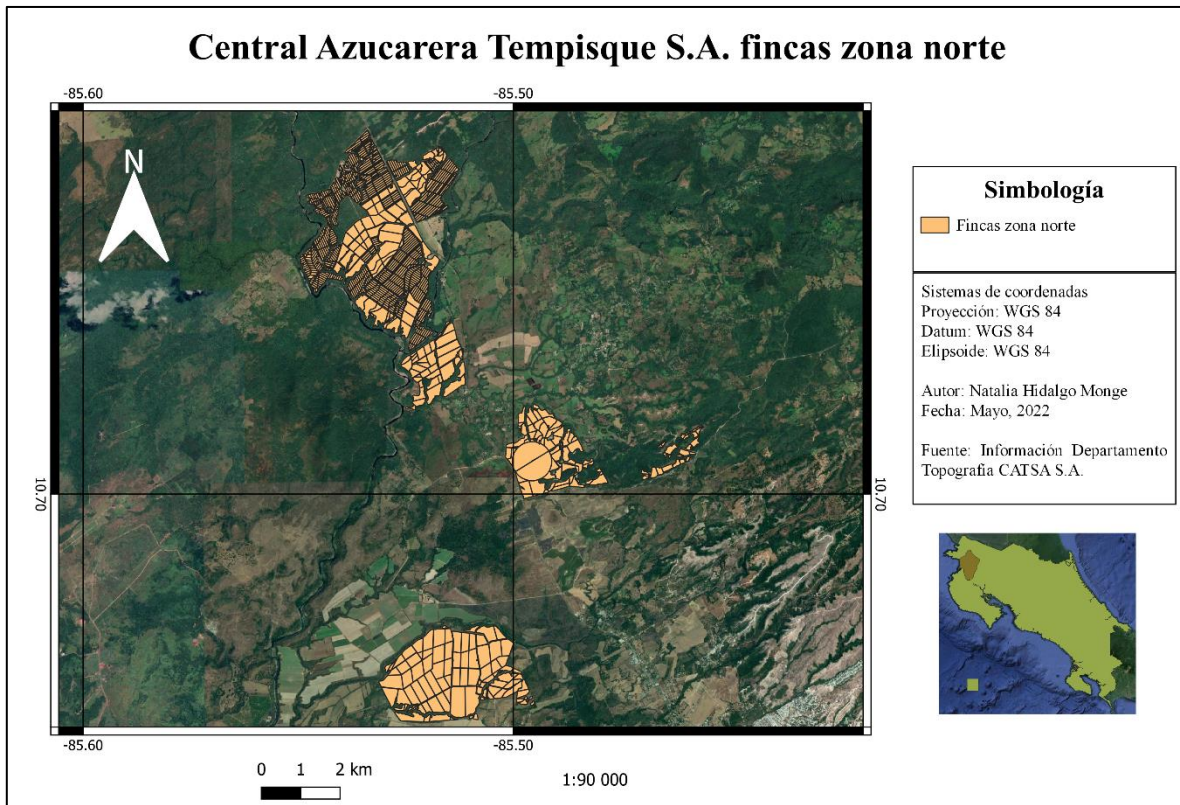


Figura 10. Mapa Central Azucarera Tempisque S.A. fincas zona norte.

Actualmente la empresa Central Azucarera Tempisque S.A. cuenta con 12 cosechadoras de caña de azúcar, de las cuales siete son modelo 3520 y cinco CH-570; cabe destacar que este último modelo es al que se le puede instalar el monitor de rendimiento, razón por la cual el desarrollo de este proyecto se centró en estas.

Para la selección de los lotes a analizar es necesario comprender la estructura operativa del proceso de cosecha dentro de la empresa. Como se mencionó anteriormente, se cuenta con dos modelos de cosechadoras, de las cuales, las cosechadoras 3520 tienen un rendimiento más bajo en comparación con las cosechadoras CH-570.

Por tal razón es que ambos modelos trabajan en conjunto; es decir, a nivel operativo no es funcional poner todas las cosechadoras CH-570 a trabajar juntas. A partir de esto se seleccionaron lotes que fueron cosechados completamente por estas cosechadoras; de esta manera se analizaron 28 lotes correspondientes a las fincas Coyolar, Garzones y Gues, para un total de aproximadamente 272 ha. E la Figura 11 se muestra un mapa con la ubicación de estas fincas.

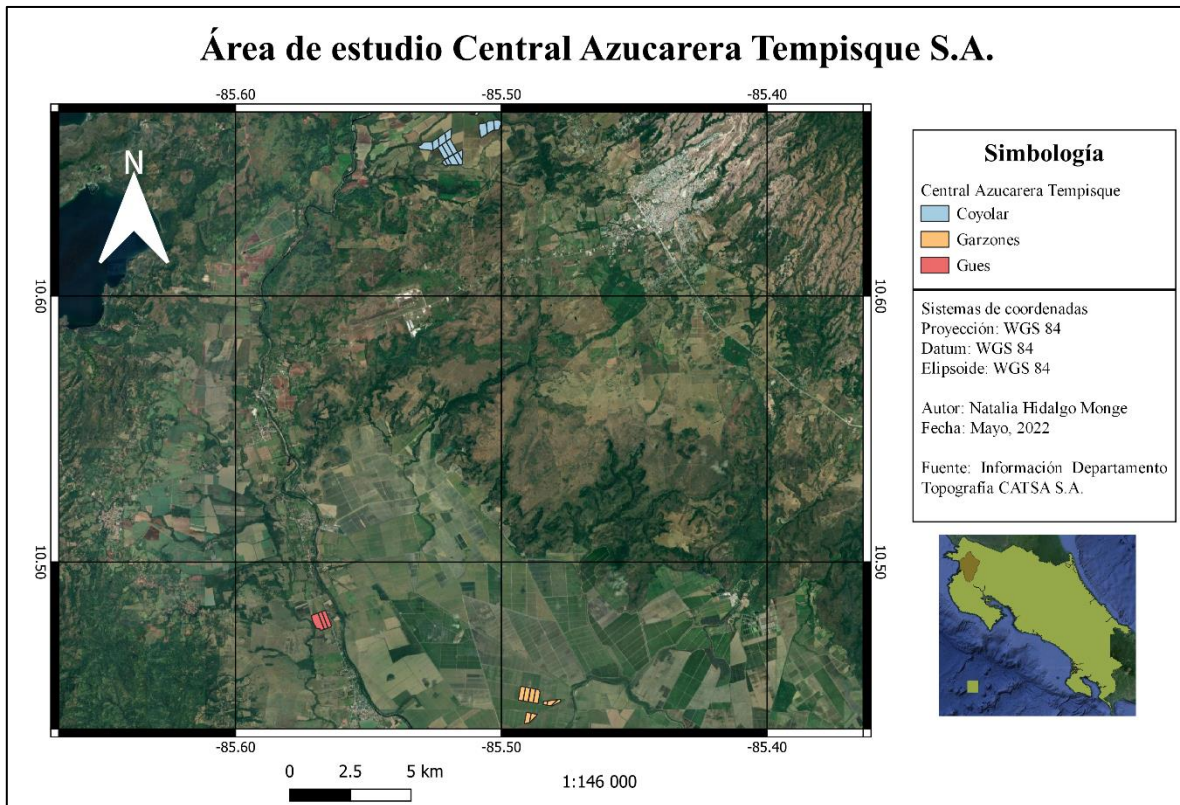


Figura 11. Mapa de las áreas de estudio.

Adicionalmente, estas cuatro máquinas tienen activado el sistema JDlink, el cual es un sistema de monitoreo que permite al encargado de la maquinaria controlar cuáles máquinas están funcionando, si lo hacen correctamente y la productividad y eficiencia de la misma. Así mismo, esto permite que exista un intercambio de información entre las cosechadoras y el centro de operaciones de John Deere.

4.2 Obtención y preparación de datos

Para la ejecución de este proyecto, primeramente, se llevó a cabo la recuperación de los datos y preparación de la información tanto de los lotes cosechados durante el periodo de zafra 2021-2022 como de las imágenes satelitales.

4.2.1 Datos de rendimiento

La información del rendimiento de cosecha se trató en dos etapas: la obtención de los datos en crudo y el procesamiento llevado a cabo sobre los mismos.

4.2.1.1 Recuperación de los datos.

Como se ha mencionado anteriormente, los datos fueron generados por el monitor de cosecha “Harvest Monitor” de la marca John Deere; así mismo, dicha información fue enviada al centro de operaciones a través de JD Link.

Una vez la información estuvo disponible en el centro de operaciones, se procedió con la descarga de los datos y los mapas de rendimiento. En cuanto a los datos de cosecha, estos fueron descargados en el formato de John Deere (.fdd y .fdl), los cuales fueron convertidos a formato shape utilizando la plataforma de OneSoil.

El archivo shape se encontraba conformado por una capa de puntos, donde cada uno de estos puntos contenía información tomada por el monitor de cosecha entre la que se incluía la velocidad de la cosechadora (km/h), consumo de combustible (l/h), distancia entre los puntos (cm), peso de la caña (kg), entre otros. Cabe mencionar que los puntos de información son tomados cada segundo una vez el sistema ha sido activado.

4.2.1.2 Post-procesamiento de la información.

Una vez obtenida la información en formato shape se procedió con la preparación de la misma, dicho post-procesamiento consistió en varias etapas, las cuales se detallan a continuación:

Filtrado de los datos

Para el filtrado de los datos, primeramente, se procedió a calcular el rendimiento en toneladas por hectárea utilizando el dato de peso de la caña y la distancia entre los puntos de medición. Seguidamente se descartaron los puntos que tenían rendimientos por encima de las 200 ton/ha, esto debido a que la empresa no maneja rendimientos por encima de este valor; además, estos valores correspondían a puntos ubicados en los extremos del lote y en algunos casos en la donde la cosechadora se detenía para terminar de llenar el volteo, es decir, pasaban grandes cantidades de caña por el sensores mientras la cosechadora no avanzaba, por esta razón se consideró prudente eliminar dicha información que podría alterar el promedio general del lote.

Escalado de los datos

Dado que se trataba de la primera vez que en la empresa se implementaban los monitores de rendimiento, fue necesario calibrar los datos con la información brindada por el departamento de cosecha, que corresponden a los datos oficiales; para esto se generó un factor de conversión, usando el rendimiento oficial obtenido de romana y el rendimiento dado por el monitor, el cual correspondía al promedio del rendimiento de cada uno de los puntos de información.

Preparación de los datos

Para esta etapa se interpoló cada uno de los lotes en estudio con el fin de promediar el rendimiento de los puntos que se encuentran dentro de esta área, para esto se utilizó el software Qgis. Como resultado de dicha interpolación, se obtuvo una capa de tipo raster, la cual fue vectorizada con el fin de clasificar los rendimientos y así generar los mapas de rendimiento correspondientes.

Cabe mencionar que el raster generado tenía un tamaño de pixel de 10 x 10 m debido a que se decidió trabajar con imágenes satelitales de Sentinel.

4.2.2 Imágenes satelitales

Como se mencionó anteriormente, para el desarrollo de este proyecto se decidió trabajar con imágenes Sentinel, a partir de las cuales se obtuvieron los índices de vegetación correspondientes.

4.2.2.1 Descarga de los índices de vegetación.

La descarga de los índices de vegetación se llevó a cabo por medio de la plataforma Google Earth Engine, en el cual se desarrolló un algoritmo que permitió descargar el NDVI, GNDVI, NDMI y MSI para las áreas de interés a partir de imágenes Sentinel.

En cuanto a la selección de las imágenes, esta se realizó según las fechas de aplicación del madurante, para esto se obtuvo la fecha de aplicación de cada uno de los lotes y se buscó la disponibilidad de imágenes anterior a dicha fecha y en las que no se tuviera presencia de nubes; de esta manera se obtuvieron los índices de vegetación para las siguientes fechas: 20 de septiembre, 5 de octubre, 10 de octubre y 9 de noviembre, todas correspondientes al año 2021.

4.3 Correlación de la información

Una vez procesada la información brindada por las cosechadoras y por los índices de vegetación se procedió a correlacionar dichos datos entre sí. Dado los buenos resultados que se han obtenido en estudios relacionados con la caña de azúcar, se procedió a trabajar con el GNDVI, NDVI, MSI y NDMI.

En la Figura 12 se muestra un diagrama de flujo que representa de manera general el procedimiento llevado a cabo para obtener la relación existente entre los datos de rendimiento y los índices de vegetación. Cabe mencionar que este procedimiento se realizó con los cuatro índices en estudio.

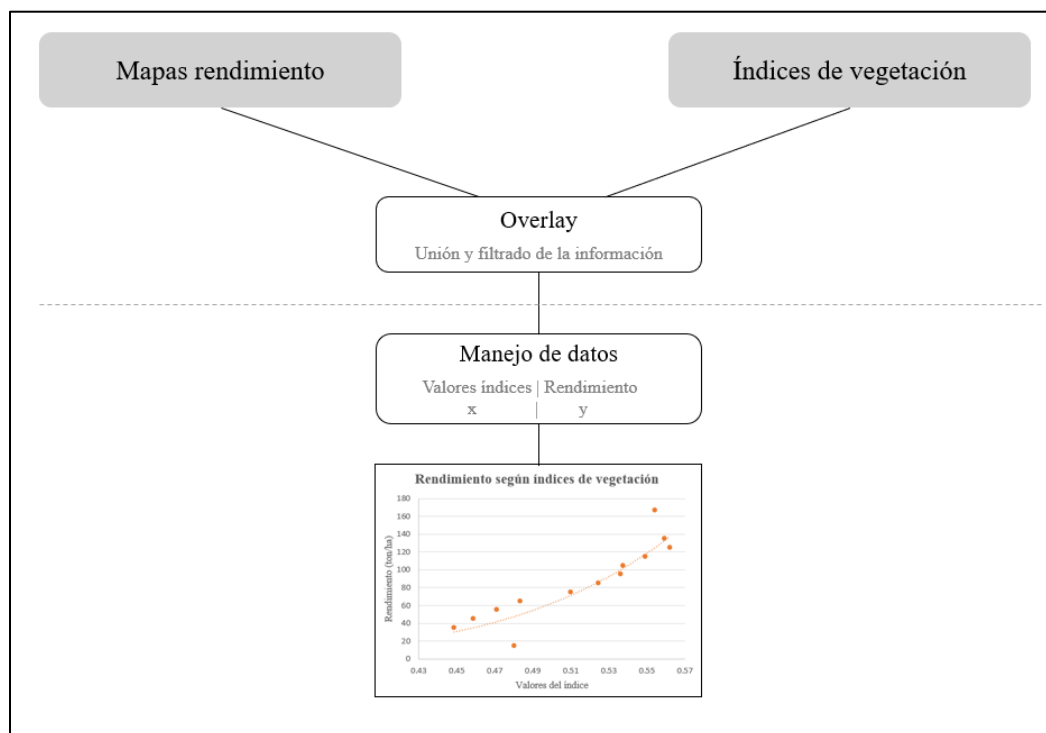


Figura 12. Diagrama de flujo de la correlación.

El proceso de correlación se dividió en dos etapas, la relación espacial entre las variables y el tratamiento de la información hasta obtener las correlaciones correspondientes, ambas etapas se detallan a continuación.

4.3.1 Relación espacial de las variables

Esta etapa incluye todas las técnicas de geoproceso que se llevaron a cabo para tener toda la información junta, las cuales se realizaron a través del software Qgis y SAGA. El objetivo de esto fue contar con una capa en formato shape en la que se recolectara toda la información, de manera que cada valor del rendimiento tuviera asociado un valor de cada uno de los índices de vegetación.

Cabe mencionar que en este paso fue necesario realizar un nuevo filtro a los datos, ya que, por el tamaño de los pixeles y el proceso de vectorizado, al unir las capas algunos valores de rendimientos no quedaban asociados a valores de los índices y viceversa; por tal razón, estos datos (ubicados en las orillas de los lotes) fueron descartados.

4.3.2 Tratamiento de la información

Una vez que se tuvo toda la información junta, se procedió a exportarla a Excel, software utilizado para realizar la correlación. Seguidamente se agruparon los datos, de manera que cada rendimiento tuviera asociado un promedio del valor del índice; así, cada rendimiento estaba relacionado con cuatro valores, uno por cada índice con el que se trabajaba.

Finalmente, se procedió a graficar rendimiento contra los valores de los índices. Para simplificar este proceso se agruparon los datos en grupos de diez toneladas por hectárea, partiendo desde las 30 ton/ha hasta las 140 ton/ha, ya que este fue el mayor tonelaje que se obtuvo en la empresa durante el periodo de zafra 2021-2022.

Si bien la literatura nos indica que por la naturaleza del proyecto se recomienda la aplicación de un análisis de regresión lineal simple, en este caso el mejor ajuste lo tenía una regresión no lineal simple de tipo potencial; sin embargo, Villón Bejar (2006) indica que tras un artificio adecuado pueden reducirse a relaciones lineales, de esta manera describe la ecuación de regresión potencial como:

$$y = ax^b$$

Donde:

x = variable independiente, variable conocida.

y = variable dependiente, variable que se trata de predecir.

a = punto donde la línea cruza el eje y .

b = coeficiente de regresión.

5. RESULTADOS

En este apartado se reúnen los principales resultados relacionados a la cosecha de la caña de azúcar, tanto los rendimientos obtenidos a través de los monitores de cosecha como la relación que estos poseen según los índices NDVI, GNDVI, NDWI y MSI.

5.1 Registro de datos de cosecha

En el Cuadro 3 se presenta la información general de los 28 lotes en estudio, los cuales fueron agrupados en 10 bloques dada la operatividad durante la cosecha. Dentro de dicha información es posible encontrar el área de cosecha, el rendimiento obtenido según la información oficial del departamento de cosecha, la fecha de aplicación del madurante y la fecha de las imágenes satelitales.

Cuadro 3. Información de los lotes de estudio.

Bloque	Área (ha)	Rendimiento (ton/ha)	Aplicación madurante	Imágenes Sentinel
Coyolar-15	16,58	68	11 noviembre, 2021	10 octubre, 2021
Coyolar-16 al 18	29,68	91	11 noviembre, 2021	10 octubre, 2021
Coyolar-26 al 28	35,75	78	10 diciembre, 2021	9 noviembre, 2021
Coyolar-36 al 40	31,96	68	3 diciembre, 2021	9 noviembre, 2021
Coyolar-56 al 58	39,62	83	16 noviembre, 2021	5 octubre, 2021
Coyolar-86	2,86	86	11 noviembre, 2021	10 octubre, 2021
Garzones-40 al 43	45,99	93	23 noviembre, 2021	9 noviembre, 2021
Garzones-45 al 47	12,13	93	23 noviembre, 2021	5 octubre, 2021
Garzones-65 al 66	14,37	115	15 noviembre, 2021	10 octubre, 2021
Gues-18 al 20	43,63	64	-	9 noviembre, 2021
Total	272,57			

Como se observa en el cuadro anterior, se presenta variabilidad entre los bloques de cosecha, dando como resultado un rendimiento promedio de 84 toneladas por hectárea.

5.2 Mapas de productividad

A partir de la interpolación de los datos obtenidos del monitor de rendimiento fueron generados los mapas de productividad que se muestran a continuación (Figura 13 a Figura 22). Cada uno de los mapas está clasificado en tres rangos de productividad: baja (menor a 60 ton/ha), medio (entre 60 y 90 ton/ha) y alta (mayor a 90 ton/ha).

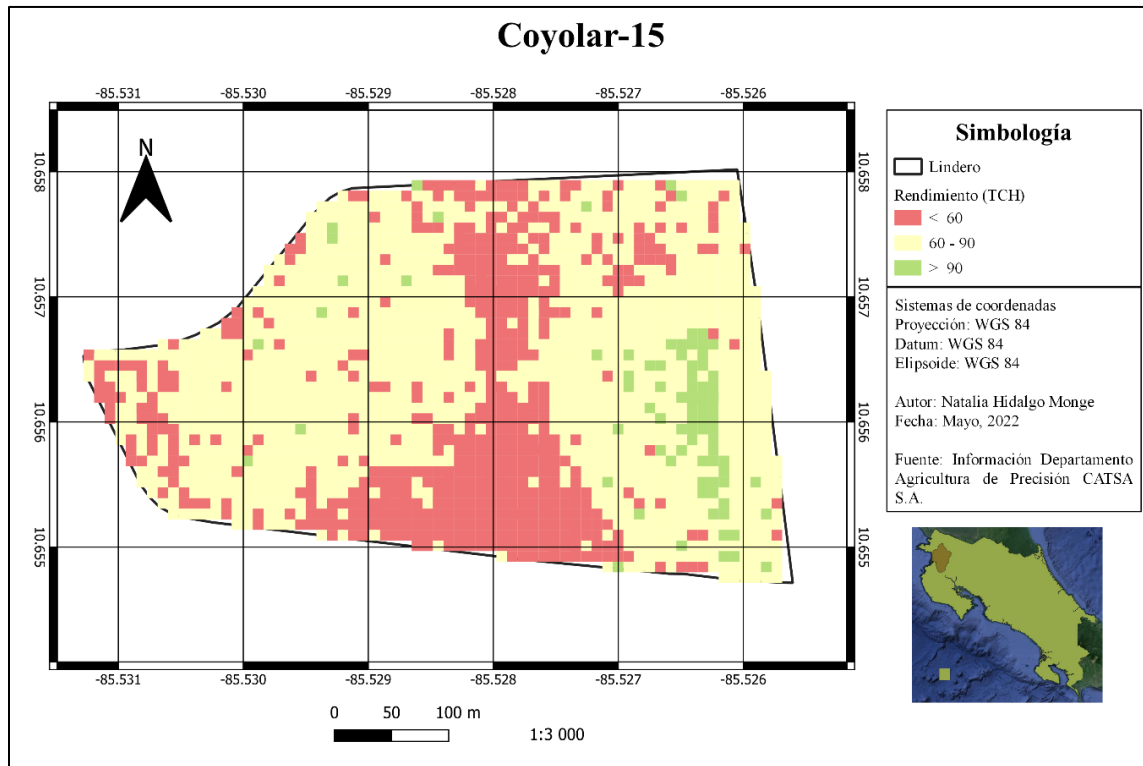


Figura 13. Mapa de productividad Coyolar-15.

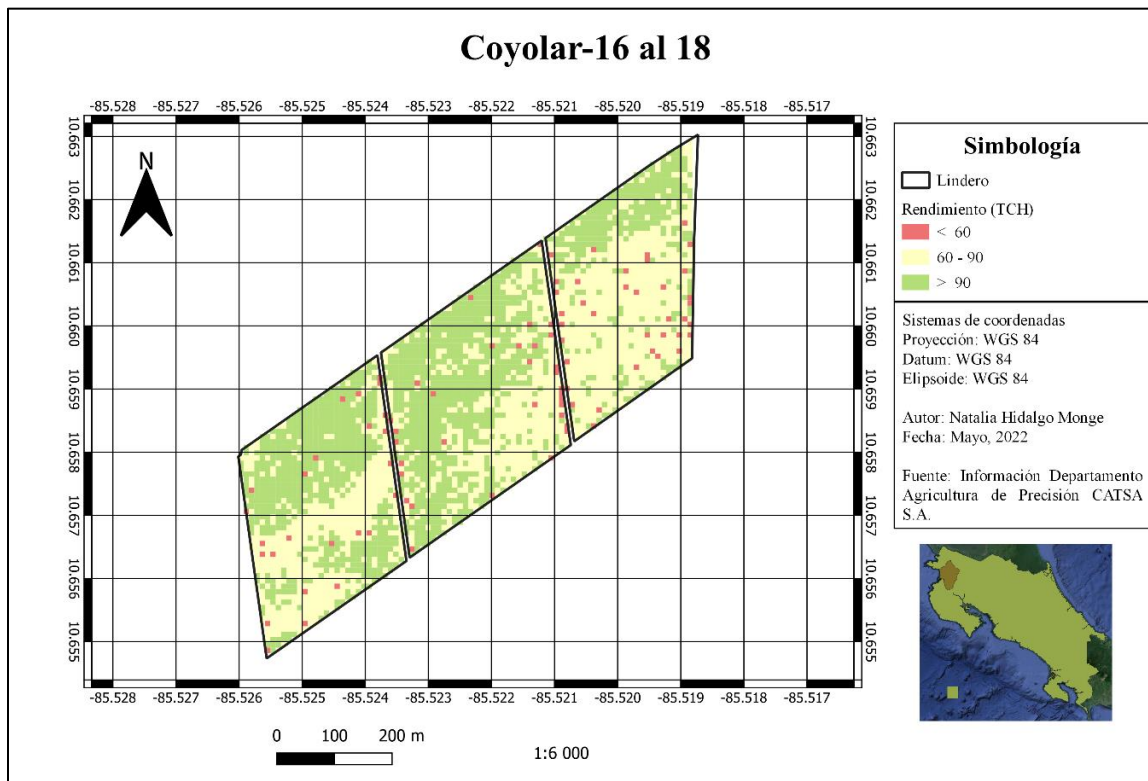


Figura 14. Mapa de productividad Coyolar-16 al 18.

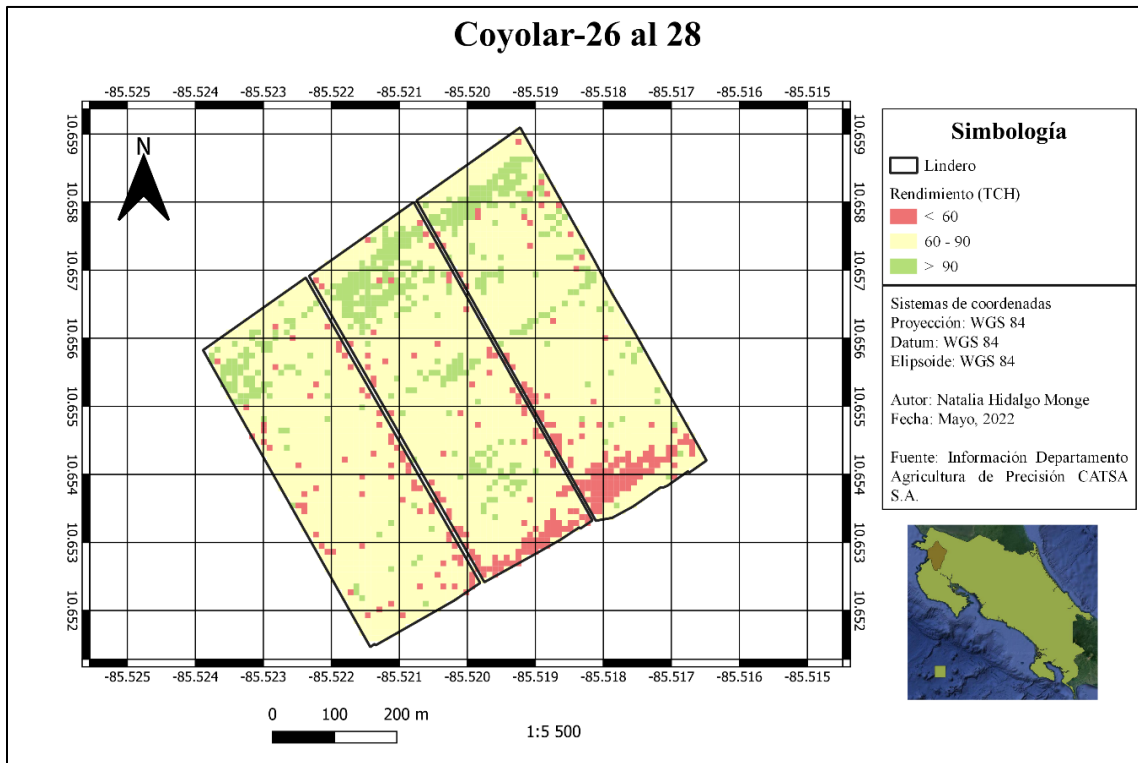


Figura 15. Mapa de productividad Coyolar-26 al 28.

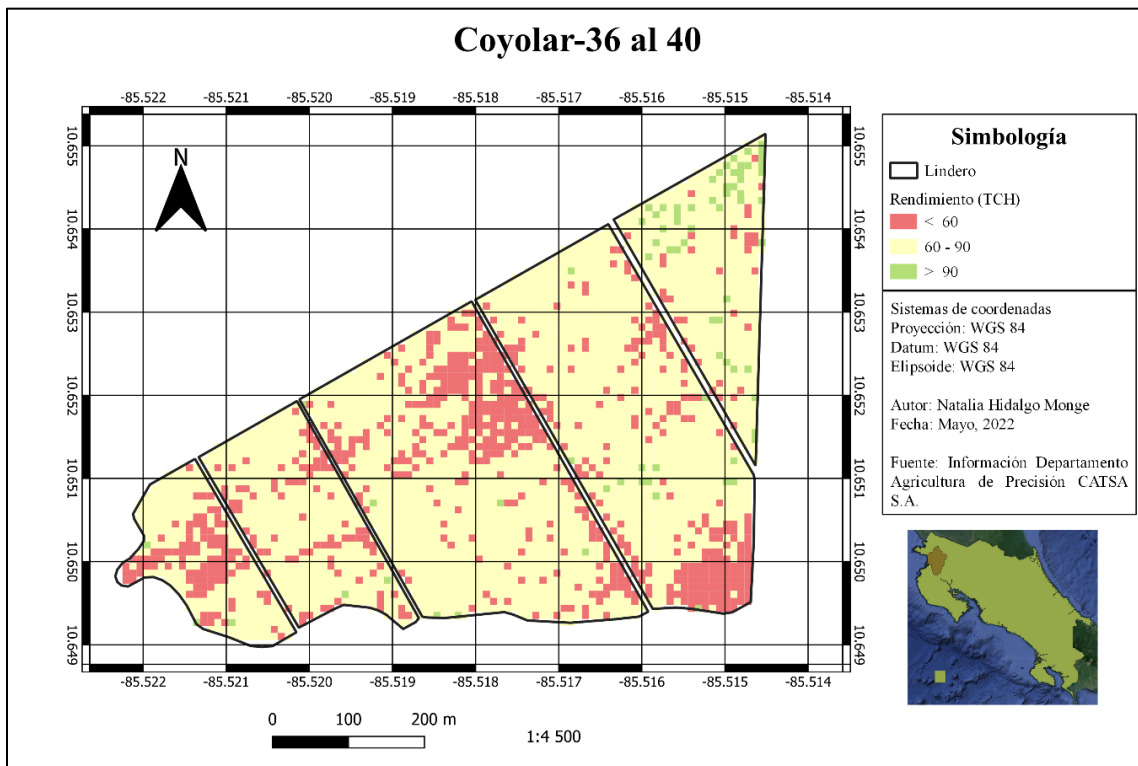


Figura 16. Mapa de productividad Coyolar-36 al 40.

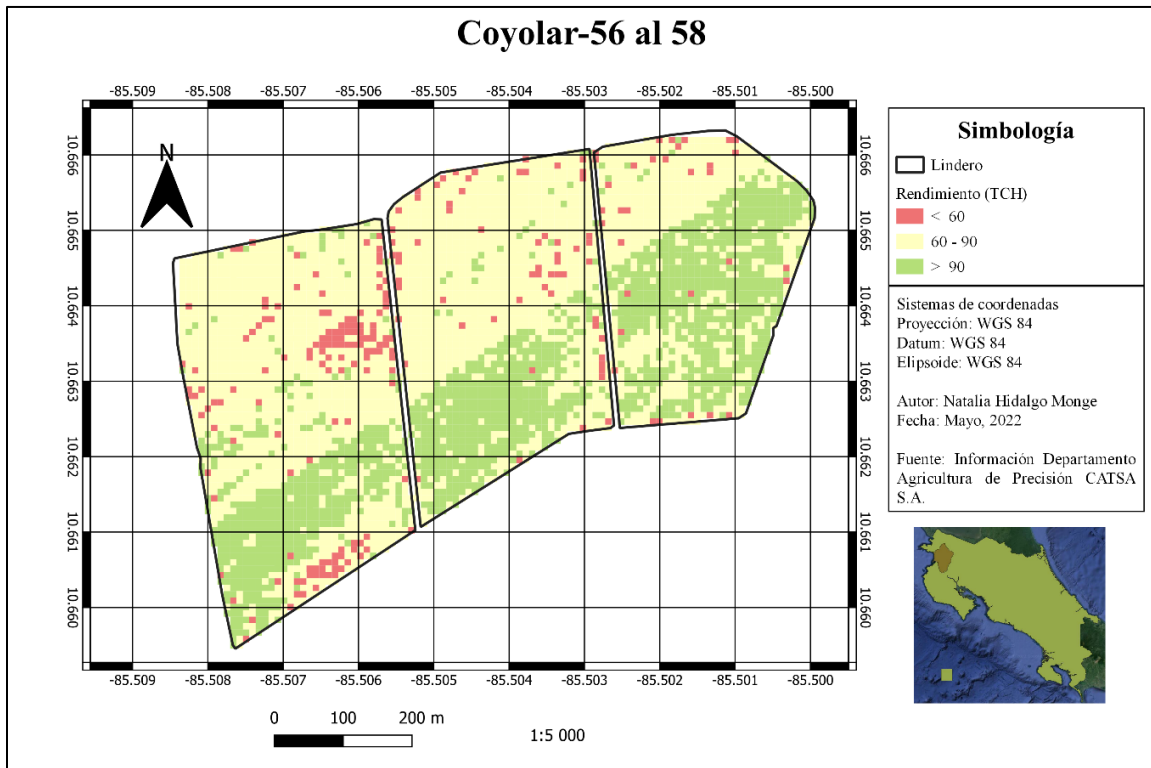


Figura 17. Mapa de productividad Coyolar-56 al 58.

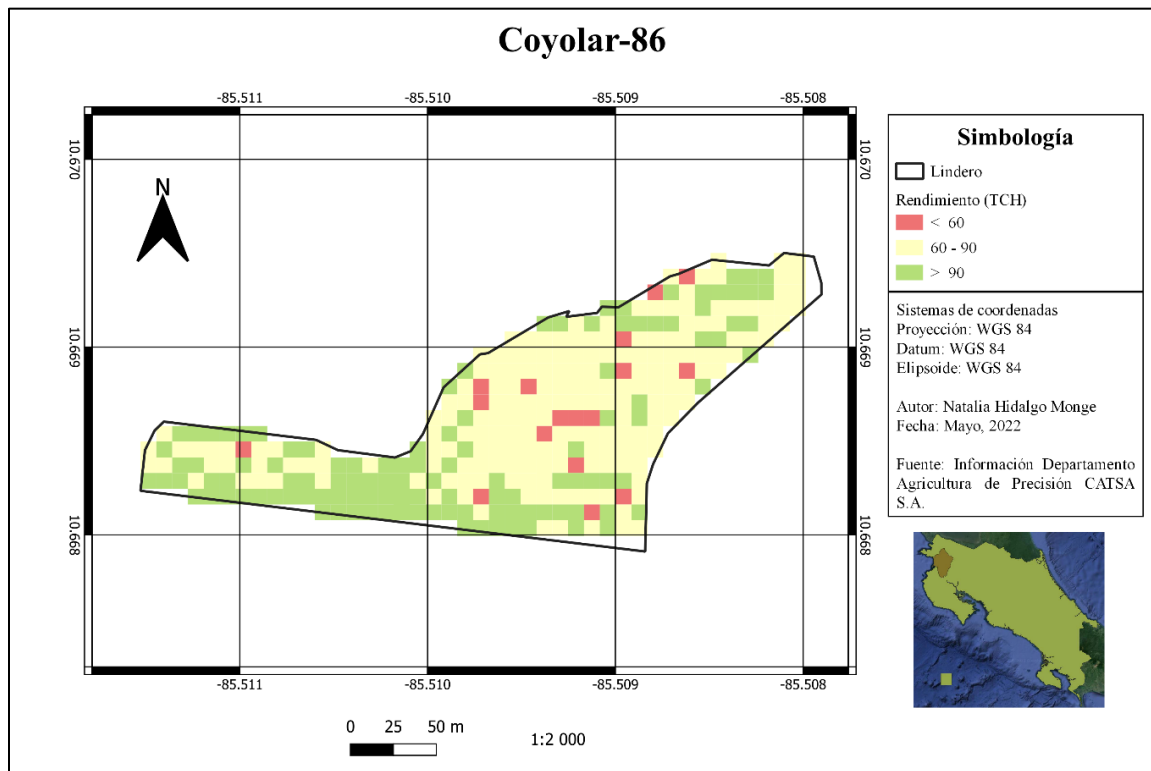


Figura 18. Mapa de productividad Coyolar-86.

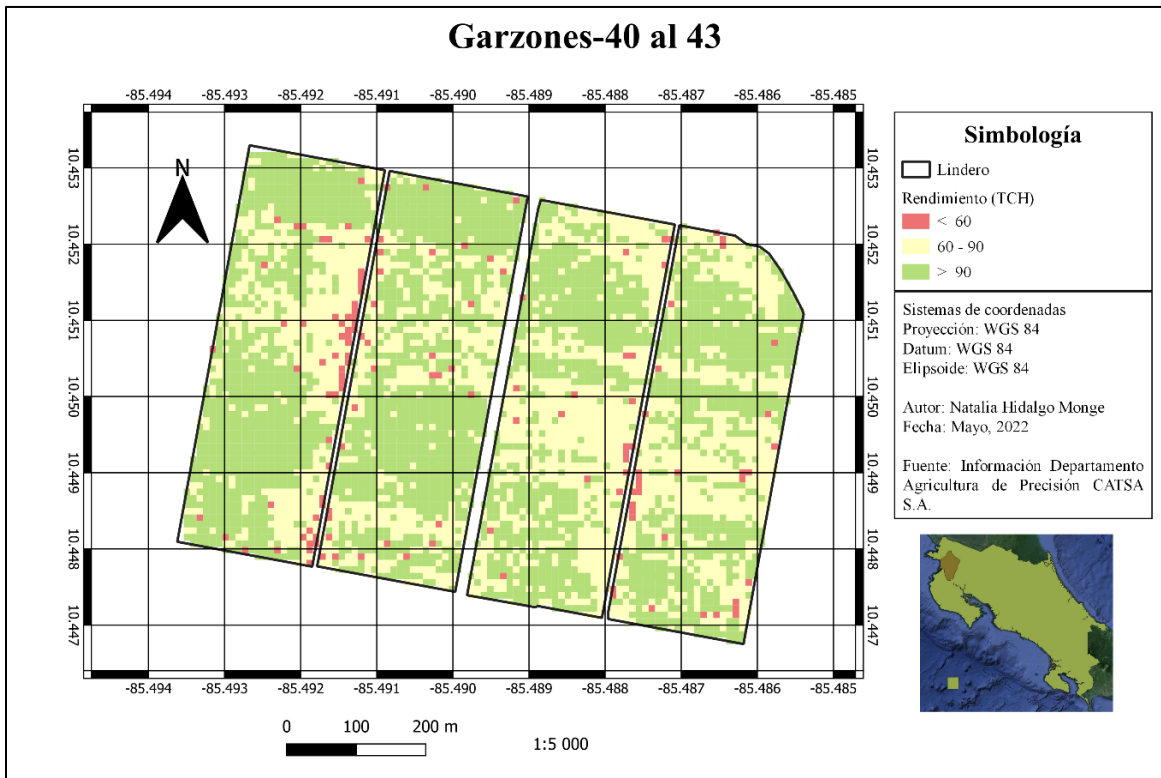


Figura 19. Mapa de productividad Garzones-40 al 43.

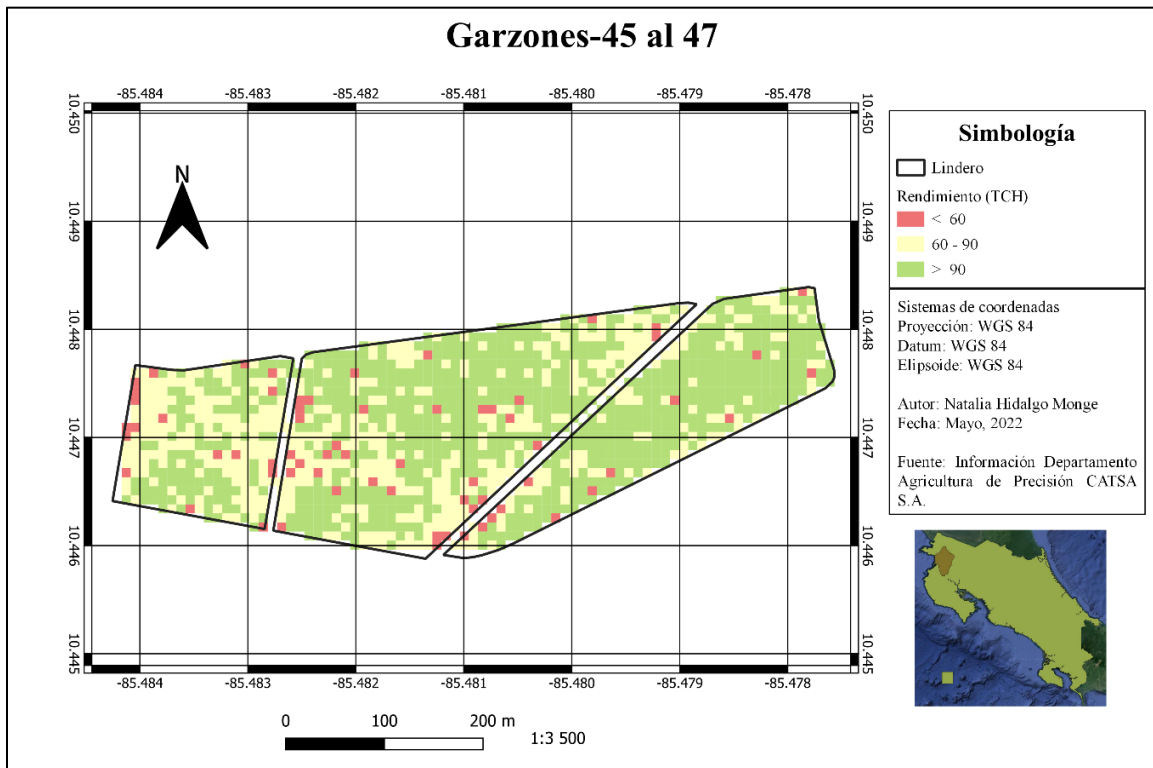


Figura 20. Mapa de productividad Garzones 45 al 47.

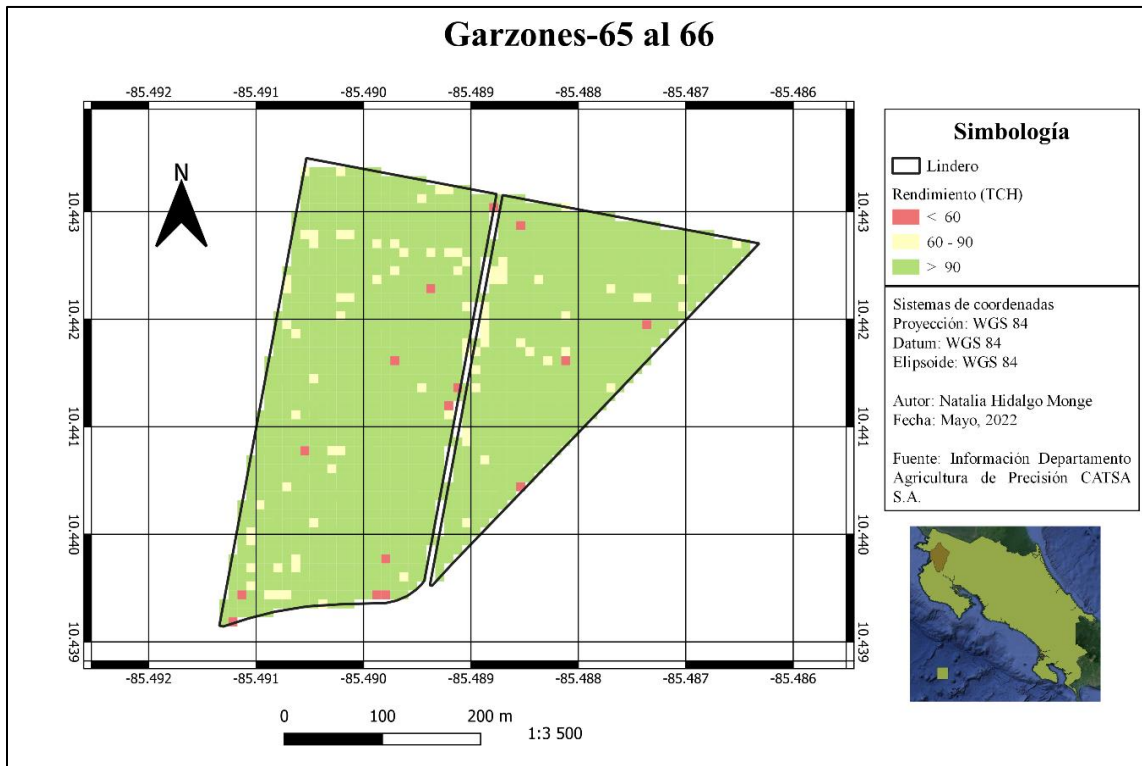


Figura 21. Mapa de productividad Garzones-65 al 66.

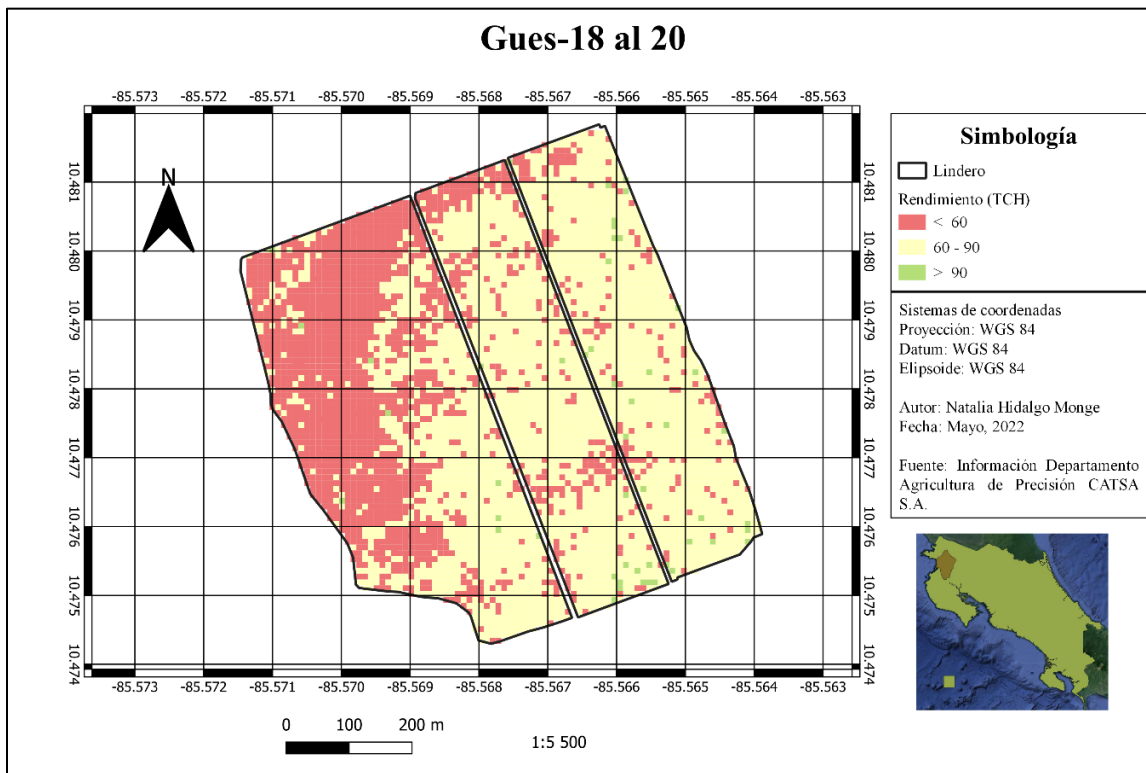


Figura 22. Mapa de productividad Gues-18 al 20.

A partir de las figuras anteriores se puede observar de manera gráfica la variabilidad de rendimientos de cosecha tanto entre bloques de lotes como dentro de estos mismos. En estos últimos es posible observar que en algunos lotes existe un patrón definido en el rendimiento, lo cual evidencia la presencia de factores externos que afectan la productividad de los mismos; por lo cual, a partir de la información generada por el monitor de cosecha y con la elaboración de los mapas, es posible generar zonas de manejo diferenciadas según las necesidades específicas de cada sección. Tal es el caso del lote 18 de Gues, el cual ya es conocido que presenta una baja productividad a causa de problemas de vetas de arena.

5.3 Correlación entre rendimiento e índices de vegetación.

Con los rendimientos de cosecha anteriormente descritos y la información obtenida de las imágenes satelitales, fueron generadas las correlaciones mostradas en la Figura 23. Dichas relaciones son aplicables a la totalidad del área en estudio.

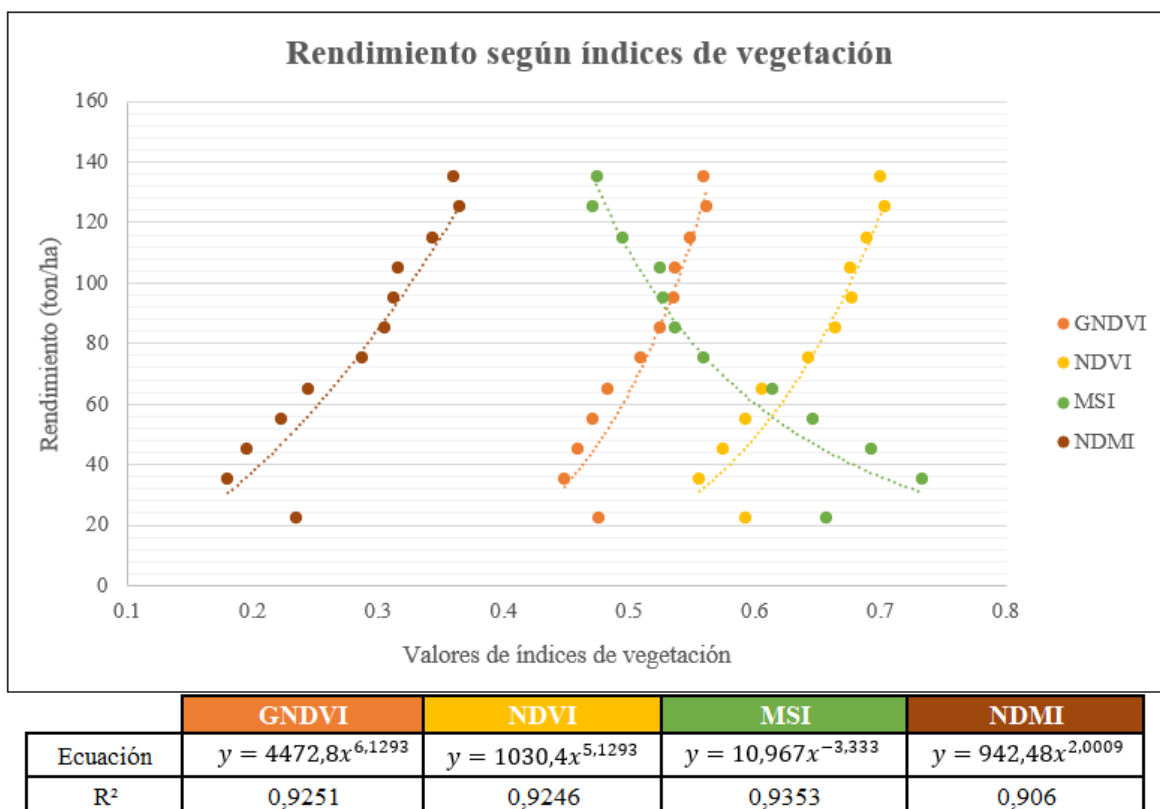


Figura 23. Relación entre rendimientos de cosecha y distintos índices de vegetación.

Como se observa en la figura anterior, el MSI fue el que obtuvo el coeficiente de correlación (R^2) más alto; sin embargo, los otros índices (GNDVI, NDVI y NDMI) también pueden considerarse como información confiable.

Cabe mencionar que a pesar de que en temas agrícolas normalmente no se obtienen correlaciones tan certeras (R^2 alrededor de los 0,6), en este caso para los cuatro índices (GNDVI, NDVI, MSI y NDMI) se obtuvieron coeficientes de correlaciones bastante altos. Este hecho se debe a la gran cantidad de información generada por el monitor de cosecha en cada uno de los lotes, lo cual permitió que las relaciones generadas fueran bastante precisas.

5.4 Evaluación de las ecuaciones de correlación.

Una vez calculado el rendimiento de cada lote según la ecuación para cada índice de vegetación se generaron los siguientes mapas. En la Figura 24 se muestra el mapa de productividad generado a partir de la información brindada por el monitor de cosecha de toda el área de estudio. En la Figura 25 se muestra el mapa de productividad generado al evaluar los índices de vegetación en las ecuaciones descritas en la Figura 23.

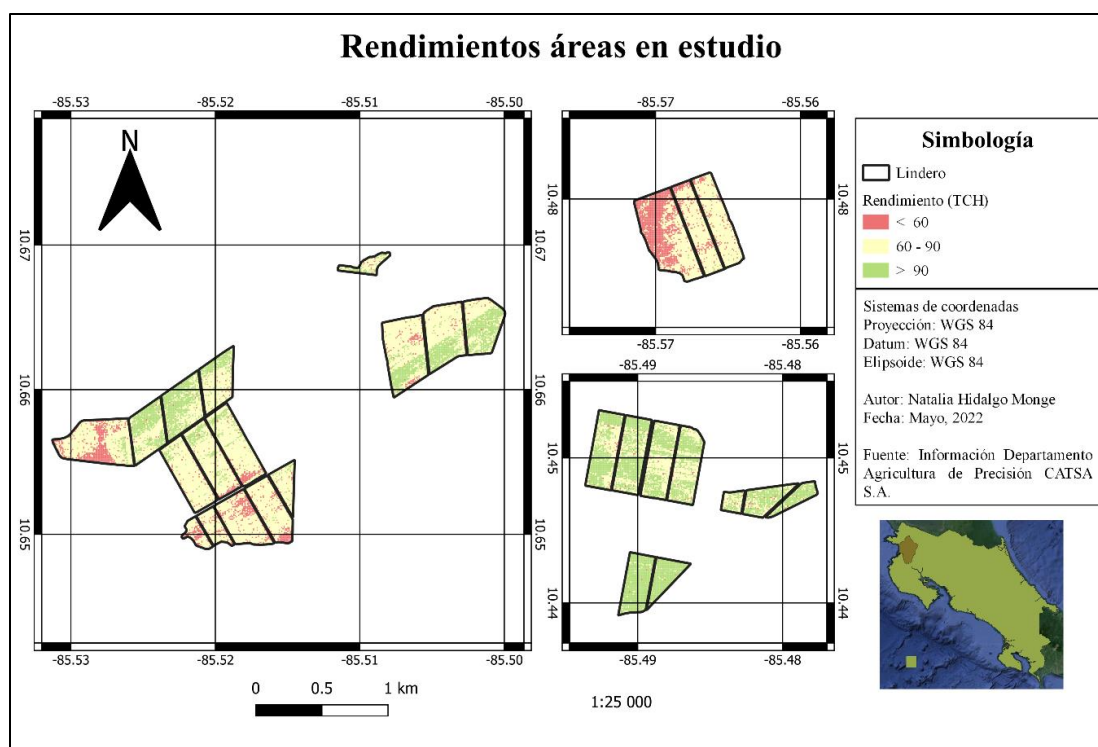


Figura 24. Mapa de productividad a partir del monitor de cosecha.

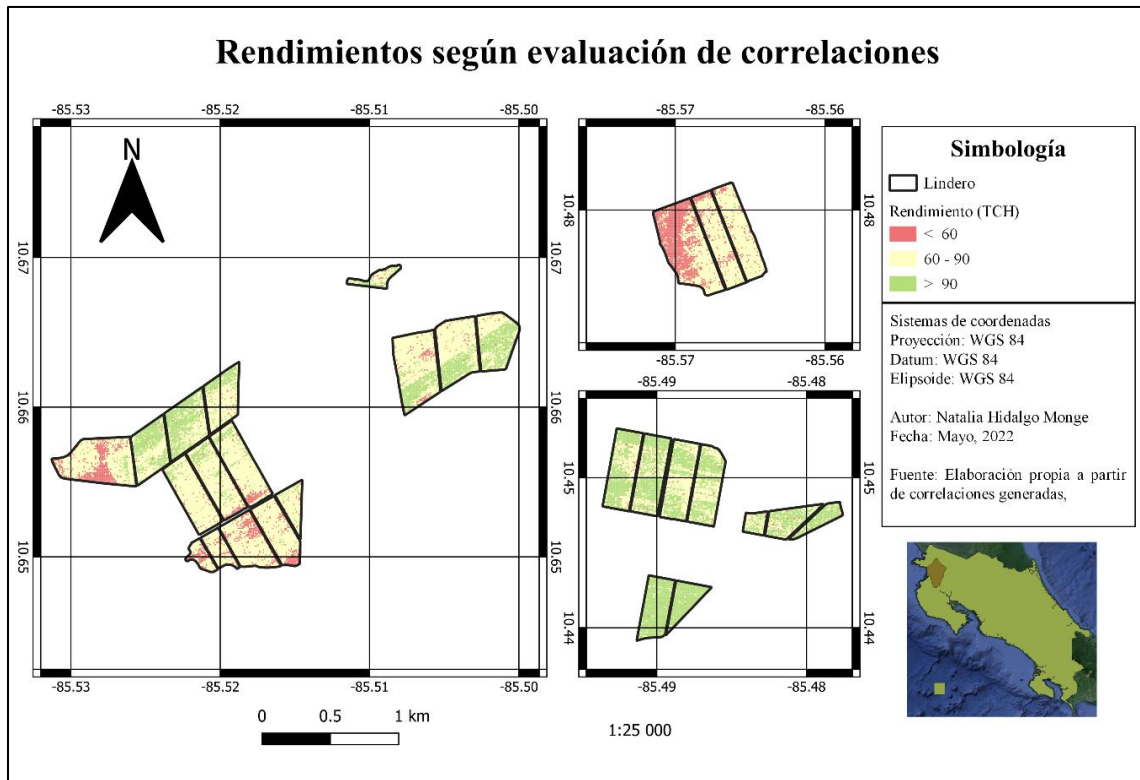


Figura 25. Mapa de productividad generado a partir de los índices de vegetación.

A pesar de que se generaron ecuaciones para cuatro índices, solo se representó uno en el mapa dado que el comportamiento de los cuatro índices era el mismo.

Así mismo, es posible observar que en ambos mapas se mantuvo la misma tendencia en cuanto a las zonas de alta, baja y media productividad, lo cual coincide con los altos coeficientes de correlación obtenidos. Sin embargo, al no tratarse de una correlación “perfecta”, el rendimiento final de cada lote varía un poco, tal y como se muestra en el Cuadro 4.

Si bien con las ecuaciones no se llega a estimar el rendimiento real de cosecha de cada lote, si es posible tener una aproximación certera y, principalmente, conocer la variabilidad de los lotes, lo cual permite llevar a cabo un monitoreo de los mismos y concentrar esfuerzos y recursos en las zonas que así lo requieran.

Cuadro 4. Rendimientos obtenidos con las ecuaciones de correlación.

Lote	Rendimientos
------	--------------

	Real	GNDVI	NDVI	MSI	NDMI
Coyolar-15	68	63	64	65	66
Coyolar-16 al 18	91	84	85	83	84
Coyolar-26 al 28	78	75	75	72	74
Coyolar-36 al 40	68	64	66	67	68
Coyolar-56 al 58	83	78	80	79	80
Coyolar-86	86	81	82	80	80
Garzones-40 al 43	93	87	89	87	86
Garzones-45 al 47	93	87	89	87	86
Garzones-65 al 66	115	114	111	107	105
Gues-18 al 20	64	60	61	62	63

5.5 Aplicación del modelo

Con los modelos generados, en el futuro no será necesario esperar a la cosecha de la caña de azúcar para determinar las zonas de alto, medio y bajo rendimiento, sino que a partir de las ecuaciones descritas anteriormente es posible estimar el rendimiento y conocer el comportamiento de los lotes; sin embargo, para esto se requiere que el modelo sea utilizado correctamente.

Para su correcta aplicación, mediante la interpretación de los índices de vegetación se debe determinar las zonas bajo, medio y alto rendimiento, de manera que se pueda obtener el valor característico del índice para cada uno de estos rangos, el cual será evaluado en la ecuación correspondiente.

La aplicación debe realizarse de esta manera dada la naturalidad del mismo; es decir que, al ser generado de manera general para varios lotes, si le aplicara de manera puntual el dato brindado sería erróneo.

5.6 Beneficios para la empresa

Al no tratarse de un proyecto de inversión para la empresa, dado que actualmente cuentan con los equipos necesarios para la generación de información, no puede analizarse como tal la viabilidad económica de la generación de los modelos. Sin embargo, su implementación conllevaría ciertos beneficios o facilidades para la empresa y sus trabajadores, tales como:

- Conocer con mayor detalle el comportamiento de los lotes, de esta manera se puede saber si las diferencias en los rangos de productividad son ocasionadas por factores externos ajenos al control de la empresa (condiciones del suelo, variedades, entre otros) o si se ha debido por alguna deficiencia en las labores culturales.
- Ligado al punto anterior, se puede llevar a cabo un mejor aprovechamiento de los recursos al distribuir los insumos según las necesidades específicas dentro del lote. Un ejemplo de esto sería realizar aplicaciones de dosis variable de fertilizantes.
- Con la aplicación del modelo también se puede realizar una clasificación de los lotes, de esta manera es posible concentrar esfuerzos y dar seguimiento a los que presentan los rendimientos más críticos, lo cual simplificaría el trabajo de los supervisores de finca.

Si bien estos modelos no generan beneficios que se pueden monetizar, si llegarían a convertirse en una herramienta de gran utilidad para la realización de diversas labores desarrolladas a lo interno de la empresa.

6. CONCLUSIONES

Con los resultados expuestos en la sección anterior es posible concluir:

Con el monitor de rendimiento es posible obtener información bastante precisa de la distribución de la cosecha gracias a la gran cantidad de datos que genera; sin embargo, esta información debe ser corroborada con romana y calibrada según sea el caso.

La información brindada por el monitor de rendimiento expresa la variabilidad que existe tanto entre lotes como dentro de estos mismos, mediante mapas de productividad representados en tres zonas de producción: alta, media y baja, según lo rendimientos manejados a lo interno de la empresa.

Los índices de vegetación presentan una relación con el rendimiento de un lote, a pesar de la gran variabilidad que estos presentan. Para el caso en estudio, el MSI fue el índice que mejor correlación posee; sin embargo, todos los índices (GNDVI, NDVI, MSI y NDMI) poseen coeficientes de correlación bastante altos, lo cual permite realizar estimaciones más certeras, con un error del 6% aproximadamente.

Para obtener buenos resultados con el modelo se deben evaluar en estos valores característicos del índice para cada rango de productividad, ya que al ser generado como un modelo general para toda el área de estudio su evaluación debe seguir la misma línea; de lo contrario, la gran variabilidad en los valores de los índices dentro de cada rango generaría estimaciones erróneas.

Con la aplicación del modelo y la elaboración de mapas es posible tener una visión más certera del comportamiento de los lotes, lo cual permitiría a la empresa llevar a cabo un mejor uso y aprovechamiento de los recursos al ir tomando acción según las necesidades específicas del lote.

7. RECOMENDACIONES

Con base a las conclusiones anteriormente expuestas, se recomienda:

Realizar un estudio exhaustivo de los lotes que presentan gran variabilidad en la producción para de esta manera definir las causas que generan las zonas de bajo rendimiento, mediante análisis químico y/o pruebas físicas del suelo.

Generar zonas de manejo diferenciadas a partir de la información generada con el modelo para así llevar a cabo las labores mantenimiento de una manera integral y según las necesidades de cada zona, con la finalidad de llevar a cabo un mejor aprovechamiento de los recursos, como es el caso de los fertilizantes.

En el caso de requerir información específica de un lote o llevar control de una determinada área, se recomienda utilizar la metodología descrita para generar nuevas correlaciones ya que dada la naturalidad de este modelo no es posible ajustarlo a un punto en particular.

Con respecto a los monitores de cosecha, se recomienda que en la próxima zafra se pueda cambiar su ubicación, es decir que cosechen lotes diferentes y sea posible generar nuevos mapas de productividad. De esta manera, se puede ir generando información histórica en cuanto a rendimientos y a su vez esto permitiría continuar alimentando el modelo.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguero Murillo, A. C. (2009). *Producción de bacterias fijadores de nitrógeno (Azotobacter, Bacillus y Pseudomonas); en medio líquido a base de melaza, para su aplicación en el cultivo de caña de azúcar (Saccharum spp.) en Azucarera El Viejo, Guanacaste, Costa Rica.* [Instituto Tecnológico de Costa Rica]. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/553/TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Alemán Montes, B. (2020). *Sistema de monitoreo espacio-tiempo del cultivo de caña de azúcar (Sacchaum officinarum), a partir de información satelital, en Coopevictoria R.L. Grecia, Costa Rica.* [Universidad de Costa Rica]. [https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/82808/TFG Bryan Alemán Montes.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/82808/TFG_Bryan_Alemán_Montes.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Alemán Montes, B., Henríquez Henríquez, C., Ramírez Rodríguez, T., & Largaespada Zelaya, K. (2021). Estimación de rendimiento en el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) a partir de fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (VANT). *Agronomía Costarricense*, 45. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/45695/45719>
- Angulo Marchena, Ál., Rodríguez Rodríguez, M., & Chaves Solera, M. (2020). *Guía técnica cultivo caña de azúcar región Guanacaste.* <https://servicios.laica.co.cr/laica-cv-biblioteca/index.php/Library/download/jieyzwRDmVvUeWJGLRfYLzXbibjflZNW>
- Auravant. (n.d.). *Índices de vegetación y su interpretación.* <https://www.auravant.com/blog/agricultura-de-precision/indices-de-vegetacion-y-como-interpretarlos/>
- Bocco, M., Sayago, S., Violini, S., & Willington, E. (2015). *Modelos simples para estimar rendimiento de cultivos agrícolas a partir de imágenes satelitales: una herramienta para la planificación.* <https://44jaiio.sadio.org.ar/sites/default/files/sts26-35.pdf>
- Bolaños Porras, J., & Oviedo Alfaro, M. (2006). *Efecto de la cosecha mecanizada sobre los rendimientos industriales de la caña de azúcar (Saccharum spp) en el ingenio Quebrada Azul, San Carlos, Costa Rica.* [Instituto Tecnológico de Costa Rica]. [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/5873/Efecto de la cosecha](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/5873/Efecto_de_la_cosecha)

mecanizada en los rendimientos industriales de la caña de azúcar %28saccharum ssp%29 en el Ingenio Quebada Azul%2C San Carlos%2C Costa Rica.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Bongiovanni, R., & Vicini, L. (2008, July). Agricultura de precisión en caña de azúcar. *10*. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-idia_xxi_cult_industriales.pdf#page=84

Campos Vargas, C. (2010). *Análisis de los cambios de cobertura de la cuenca alta y media del río Reventazón, Costa Rica, periodo 2000-2010*. [Instituto Tecnológico de Costa Rica].

https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3002/Trabajo_final.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Cerri, D., & Graziano, P. (2005). *Monitor de rendimiento de caña de azúcar*. <https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-monitoreo-rendimiento-en-cana-de-azucar.pdf>

Chica, H., Gómez González, A., & Melo Hernández, Y. (2016). *Diseño de muestreo multi-etápico para estimaciones de producción del cultivo de caña de azúcar en toneladas por hectárea a nivel de suerte*. <https://www.atamexico.com.mx/wp-content/uploads/2017/11/3-COSECHAS-2016.pdf>

Cittadini, M., Del Boca, A., Fuentes, L., & Nardi, F. (2016). *Relación entre índices de vegetación y rendimiento en maíz*. [Universidad Nacional de Córdoba]. [https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/4733/Relación entre índice de vegetación - Cittadini%2C M. - Del Boca%2C A. - Fuentes%2C L. - Nardi%2C F..pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/4733/Relación%20entre%20índice%20de%20vegetación%20-%20Cittadini%20M.%20-%20Del%20Boca%20A.%20-%20Fuentes%20L.%20-%20Nardi%20F..pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Cocero Matesanz, D., & Santos Preciado, J. (n.d.). *Los SIG raster: herramienta de análisis medioambiental y territorial*. [Universidad Nacional de Educación a Distancia]. <https://canal.uned.es/uploads/materials/resources/pdf/3/6/1259093906763.pdf>

Di Rienzo, J., Casanoves, F., Ganzalez, L., Tablada, E., Díaz, M., Robledo, C., & Balzarini, M. (2005). *Estadística para la ciencias agropecuarias*. (Sexta). [https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/2968/mod_resource/content/0/Estadística para las Ciencias Agropecuarias_-_Di_Rienzo.pdf](https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/2968/mod_resource/content/0/Estadística_para_las_Ciencias_Agropecuarias_-_Di_Rienzo.pdf)

- Díaz García, J. J. (2015). *Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión*. [Universidad Complutense de Madrid]. https://eprints.ucm.es/id/eprint/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf
- Dolores Marcelo, H., & Aldana Diestra, A. (2011). *Manejo integrado del cultivo de caña de azúcar*. https://www.agrobanco.com.pe/pdfs/capacitacionesproductores/Cania/MANEJO_INTEGRADO_DEL_CULTIVO_DE_CANA_DE_AZUCAR.pdf
- Domínguez, C., & Rodríguez, J. E. (2015). *Método de estimación del rendimiento precosecha en el cultivo de Sorgo granífero*. [Universidad Nacional de Córdoba]. [https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/1851/Dominguez_Rodriguez - Método de estimación del rendimiento precosecha.pdf?sequence=1](https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/1851/Dominguez_Rodriguez_Metodo_de_estimacion_del_rendimiento_precosecha.pdf?sequence=1)
- European Space Agency. (n.d.). *Sentinel-2*. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>
- Galvis Mantilla, D. (n.d.). *Los sistemas de corte mecanizado de caña de azúcar: equipos de cosecha*. <https://siiba.conadesuca.gob.mx/siiba/Consulta/verDoc.aspx?num=652>
- García, E., & Flego, F. (n.d.). *Agricultura de Precisión*. <https://www.palermo.edu/ingenieria/downloads/pdfwebc&T8/8CyT12.pdf>
- Gómez Calderón, N., & Solórzano Quintana, M. (2017). *Agricultura precisa y exacta en tiempo, lugar y cantidad de insumos utilizados*. https://revistas.tec.ac.cr/index.php/investiga_tec/article/download/3144/2864
- Hernández Camacho, M. (2018). *Análisis de la demanda hídrica de los cultivos de caña de azúcar, arroz, sandía y melón en la cuenca media y baja del Río Tempisque, mediante el tratamiento de imágenes satelitales en el periodo de 1990-2017*. [Instituto Tecnológico de Costa Rica]. [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9887/analisis_demanda_hidrica_cultivos_caña_azucar_arroz_sandia_melon_cuenca_media_baja_rio_tempisque_mediante_tratamiento_imagenes_satelitales_periodo.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9887/analisis_demanda_hidrica_cultivos_ca%C3%B1a_azucar_arroz_sandia_melon_cuenca_media_baja_rio_tempisque_mediante_tratamiento_imagenes_satelitales_periodo.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Instituto Geográfico Nacional. (n.d.). *Teledetección*.
[https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/OBS-Teledeteccion.pdf#:~:text=La teledetección es la técnica,información interpretable de la Tierra.](https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/OBS-Teledeteccion.pdf#:~:text=La%20teledetecci%C3%B3n%20es%20la%20t%C3%A9cnica%20informaci%C3%B3n%20interpretable%20de%20la%20Tierra.)
- Intagri. (n.d.). *El monitoreo herramienta básica en los programas de MIP y MIE en hortalizas*. <https://www.intagri.com/articulos/fitosanidad/el-monitoreo-herramienta-basica-en-los-programas-mip-mie>
- John Deere. (2018). *Ficha técnica Harvest Monitor John Deere*.
- Kopper Sandoval, J. C. (2015). *Determinación de la eficacia del ácido giberélico (PROGIMM 40 WG) sobre el rendimiento y la calidad de la caña de azúcar (Saccharum spp.) var. NA 56-42 en Liberia, Guanacaste, Costa Rica*. [Instituto Tecnológico de Costa Rica].
https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6484/determinacio_eficacia_acido_giberelico_cana_de_azucar.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Lago, C., Sepúlveda, J. C., Barroso, R., Fernández, F., Maciá, F., & Lorenzo, J. (2011). *Sistema para la generación automática de mapas de rendimiento. Aplicación en la agricultura de precisión*.
https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292011000100009
- López López, D., & Torres Gómez, A. (n.d.). *¿Cuáles son los componentes del dato espacial?* CONACYT.
[https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1012/181/1/08-¿ Cuáles son los Componentes del Dato Espacial - Diplomado en Análisis de Información Geoespacial.pdf](https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1012/181/1/08-¿%20Cu%C3%A1les%20son%20los%20Componentes%20del%20Dato%20Espacial%20-%20Diplomado%20en%20An%C3%A1lisis%20de%20Informaci%C3%B3n%20Geoespacial.pdf)
- Loría Solano, A. (2018). *Identificar áreas de cultivo de café, por medio de una clasificación semi supervisada con imágenes satelitales multiespectrales, para el cantón de Pérez Zeledón*. [Instituto Tecnológico de Costa Rica].
https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/11289/identificar_areas_cultivo_cafe.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Madrid, A., & Ortiz, L. (n.d.). *Análisis espacial*.
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/2864/02CAPI01.pdf?sequence=9>

&isAllowed=y

- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (1991). *Caña de azúcar*.
<http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-0658cana.pdf>
- Mosquera, C. (2010). *Mapas de productividad como herramienta para entender y gerenciar el cultivo de caña*. <http://agroap.com/>
- NASA. (n.d.-a). *Landsat Science*. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- NASA. (n.d.-b). *NDMI (Índice de Humedad de Diferencia Normalizada)*. Earth Observing System. <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndmi/>
- Nova V, J. (2008). Siembra mecanizada de la caña de azúcar en Brasil. *Tecnicana*, 31–36.
<https://www.yumpu.com/es/document/read/14868369/siembra-mecanizada-de-la-cana-de-azucar-en-brasil>
- Romero Calvo, K. (2017). *Generación de mapas de productividad en caña de azúcar (Saccharum officinarum) para la implementación de agricultura de precisión en el ingenio Taboga S.A.* Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Ruiz, J. (2018). *Índices de vegetación en agricultura de precisión*.
<https://www.agromatic.es/indices-de-vegetacion/>
- Sapag, N. (2011). *Proyectos de inversión: formulación y evaluación*. (P. Education (ed.); 2 ed).
- Satorra, J. (2018). *¿Es rentable la agricultura de precisión?*
<https://repositori.udl.cat/bitstream/handle/10459.1/65453/028057.pdf>
- Serrano Núñez, V., Guillén Rivera, S., Watson Hernández, F., Solórzano Quintana, M., & Gómez Calderón, N. (2022, May). AGRINNOVACIÓN 4.0: Herramienta metodológica de clasificación para determinación de áreas de producción de cultivos de ciclo corto. *Tecnología En Marcha*, 45–58.
https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/6059/5949
- Sugar Research Australia. (2015). *Precision Agriculture for the Sugarcane Industry*.
- Villatoro, B. (2021). *Uso de índices de vegetación NDWI y MSI obtenidos de imágenes*

satelitales Sentinel-2 y Landsat 8 para monitoreo de humedad, como indicador de momento óptimo de cosecha de caña de azúcar.
<https://cengicana.org/files/20200928140832631.pdf>

Villón Bejar, M. (2006). *Hidrología estadística*. (1st ed.). Editorial Tecnológica de Costa Rica. <https://ebooks-tec-ac-cr.ezproxy.itcr.ac.cr/pdfreader/hidrologa-estadstica>

Watson Hernández, F., Gómez Calderón, N., & Pereira da Silva, R. (2022). Oil palm yield estimation based on vegetation and humidity indices generated from satellite images and machine learning techniques. *4*, 279-291. <https://www.mdpi.com/2624-7402/4/1/19>

Zenteno Cruz, G. A., Palacios Vélez, E., Tijerina Chávez, L., & Flores Magdaleno, H. (2017). *Aplicación de tecnologías de percepción remota para la estimación del rendimiento de caña de azúcar*. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342017000701575