

UNIVERSIDAD TECNICA NACIONAL
SEDE GUANACASTE
INGENIERÍA AGRONÓMICA CON ÉNFASIS EN RIEGO Y DRENAJE



**CORRELACIÓN ENTRE LA HUMEDAD DEL SUELO Y LOS ÍNDICES NDVI Y
NDWI COMO INDICATIVO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN EL CULTIVO DE
CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum officinarum*) EN LA VARIEDAD
BC 001220, INGENIO TABOGA 2019.**

MARICRUZ SEGURA HERRERA
5 0390 0274

CAÑAS, GUANACASTE, 2020

MIEMBROS DE TRIBUNAL EVALUADOR

Este trabajo Final de Graduación fue aceptado por el Tribunal de la carrera de Ingeniería Agronómica con énfasis en Riego y Drenaje de la Universidad Técnica Nacional, sede Guanacaste, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciada.

Ing. Fabricio Camacho Calvo, MSc

Profesor Tutor Interno

Ing. Kerin Romero Calvo, MSc.

Profesor Lector

Ing. Jairol Jara Blanco, MSc.

Profesor Lector

Ing. María de los Ángeles Arias Alfaro, MSc.

Presidente del Tribunal

Maricruz Segura Herrera

Sustentante

Dedicatoria

El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador de darme fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que somos. Son mi orgullo y tengo el privilegio de ser su hija, los amo y son los mejores padres que Dios pudo darme, gracias por cada paso que dimos juntos.

A mi hermana y mis sobrinos, quienes me mantienen en pie siempre con sus risas y su motivación. Este gran amor que nos ha hecho salir adelante.

A mi abuelita Flory, quién siempre ha estado conmigo en las buenas y en las no tan buenas, motivándome y dándome lo mejor de sí para no rendirme, quien también me ha dado la fortaleza y energía para salir adelante, gracias por tu amor abuelita.

A mis abuelitos quienes también me han apoyado y motivado en este proceso y han estado siempre brindándome su apoyo y su amor incondicional.

Además, se los dedico a todas las personas que han estado a mi lado apoyándome a lo largo de toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida. En especial a quienes me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación tanto profesional y como ser humano.

Dios les bendiga siempre y les siga llenando de su amor eterno.

Maricruz Segura Herrera

Agradecimiento

También quiero agradecer a todos los profesores que, desde mi inicio en la carrera y hasta el día de hoy han sido parte fundamental de mi crecimiento como aprendiz en esta etapa de mi vida. Gracias por la paciencia durante estos años, por su respeto, amabilidad y consejos. También por enseñarme el valor que representa las horas de sueño por estudiar, la dedicación de los trabajos y lo que debemos forjarnos en este camino de aprendizaje.

Gracias infinitas a todos mis profesores en general de la carrera y a los que se unieron a mi equipo para orientarme a hacer lo mejor y a dar siempre lo mejor. A mi Profesor, Tutor Interno Ing. Fabricio Camacho Calvo, MSc, al Profesor Lector Lic. Kerin Romero Calvo, al Profesor Lector Ing. Jairol Jara Blanco, MSc y a la Presidente del Tribunal también profesora de inicio de mi carrera la Ing. María de los Ángeles Arias Alfaro, MSc.

Además, agradecer a mis amigos, los cuales siempre me apoyaron y me alentaron para no rendirme.

Dios les bendiga siempre.

Maricruz Segura Herrera.

Tabla de contenidos

MIEMBROS DE TRIBUNAL EVALUADOR.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimiento.....	iv
Tabla de contenidos	v
Índice de figuras.....	ix
Índice de tablas	xii
Resumen.....	xiii
Capítulo I. Trabajo de Investigación.....	14
1.1 Introducción	14
1.2 Área de estudio.....	15
1.3 Delimitación del problema	16
1.4 Justificación.....	17
1.5 Situación actual del conocimiento del arte.....	19
1.6 Objetivos de investigación	23
1.6.1 Objetivo General	23
Capitulo II. Marco Teórico Referencial.....	24
2.1 Condiciones Generales del Cultivo Caña de Azúcar	24
2.2 Etapas fenológicas del cultivo	25
2.3 Problemas de estrés hídrico en cultivo	29
2.4 Requerimientos Fisio edáficos	30
2.5 Clasificación taxonómica de suelos	31
2.5.1 Textura	31
2.6 Orden de suelos estudiados en esta investigación.....	31
2.6.1 Inceptisoles.....	31
2.6.2 Vertisoles.....	32
2.6.3 Porosidad del suelo	32
2.6.4 Capacidad de Campo de un Suelo (CC) y Punto Marchitez Permanente (PMP).....	33

2.7 Densidades del suelo	34
2.7.1 Densidad Aparente	34
2.7.2 Densidad real	35
2.8 Humedad del suelo	36
2.8.1 Humedad gravimétrica	37
2.8.2 Humedad volumétrica	37
2.8.3 Lámina de agua en el suelo	37
2.8.4 Agua en el suelo	38
2.9 La Teledetección	40
2.10 Satélites y características.....	41
2.10.1 Sentinel 2 A y B	41
2.10.2 Resolución espacial del Sentinel	43
2.10.3 Landsat 8	43
2.10.4 Satélite Spot 4 y 5	44
2.11 Índices para estudio vegetativo	46
2.11.1 Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI).....	46
2.11.2 Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI).....	48
2.11.3 Índice de Vegetación de Diferencia Verde Normalizado (GNDVI)	50
2.11.4 El Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)	51
2.12 Sistemas de Información Geográfica	52
2.13 Procesamiento de imágenes satelitales.....	52
2.13.1 Imágenes Satelitales	52
2.13.2 Correlación espacial	53
2.13.3 Lectura de archivos	54
2.13.4 Descarga de imágenes Sentinel 2 A y B	54
2.13.5 Capas raster	55
2.13.6 Capas vectoriales.....	55

2.13.7 Diseño de una capa raster a capa vectorial.....	56
2.13.8 Combinación de dos capas en la imagen Sentinel 2 para obtener índices.	56
2.13.9 Diseño de tonalidades de las capas.	56
2.14 Diseño de un mapa.....	57
Capítulo III. Marco Metodológico.....	58
3.1 El paradigma	58
3.2 El enfoque	58
3.3 Tipo de investigación.....	58
3.4 Hipótesis.....	59
3.4.1 Hipótesis Nula.....	59
3.4.2 Hipótesis Alternativa.....	59
3.5 Población.....	61
3.6 Las técnicas de muestreo y establecimiento de las muestras	61
3.6.1 Selección de lote a evaluar	61
3.6.2 Modelo matemático.....	62
3.6.3 Selección de los puntos de muestreo.....	63
3.6.4 Ubicación y marcaje de los puntos a muestrear de los lotes	63
3.6.5 Establecimiento de puntos georreferenciados	63
3.6.6 Ubicación de desarrollo práctico.....	64
3.7 Trabajo en campo	64
3.7.1 Toma de las muestras de suelo.....	64
3.7.2 Toma de datos de humedad en campo	64
3.8 Manejo en Laboratorio.....	65
3.9 Obtención de Imágenes Satelitales.....	66
3.9.1 Características deseadas de las imágenes.....	66

3.9.2 Corrección de imágenes satelitales	67
3.10 Los instrumentos y el proceso para validarlos	68
3.11 Proceso de Imágenes para NDVI y NDWI	68
3.11. 1 Creación de linderos y puntos de muestreo	69
3.11.2 Intersección vectorial entre los índices y los datos de humedad	70
3.11.3 Producción de mapas	70
3.12 Correlación de datos de índices con humedades de suelo.....	70
Capítulo IV. Presentación y análisis de los resultados	73
4.1 Ubicación de las zonas de estudio.....	73
4.2. Proceso de muestras en laboratorio de suelos	74
4.2.1 Resultados de muestras de densidad aparente y real en promedio para la zona de San Carlos (inceptisoles) y Hortigal (Vertisoles).....	75
4.3. Diseño de mapas	76
4.3.1 Mapas de texturas de suelo	76
4.3.2 Toma de muestras de humedad en campo de acuerdo al paso del satélite.....	79
4.3.3 Mapa de ubicación de puntos de evaluación.....	80
4.4 Análisis Mapas de Índices Vegetación (NDVI) y Índices de Agua (NDWI).	83
4.4.1 Mapas de Índices Vegetación (NDVI)	83
4.4.2 Mapas de Índices de Agua (NDWI).....	91
4.5 Datos de correlación entre índice de vegetación NDVI e NDWI contra humedad de suelo.	97
4.6 Análisis de Gráficos	99
4.6.1 Gráficos de sección San Carlos Lote I	99
4.6.2 Gráficos de lote Hortigal L con tipo de suelo Arcilloso.....	102
4.7 Correlación entre los índices NDVI y NDWI de la Sección San Carlos	109
4.8 Correlación entre los índices NDVI y NDWI de la Sección Hortigal	111
4.9 Discusión de resultados.....	112

V. Conclusiones y Recomendaciones.....	114
5.1 Conclusiones	114
5.2 Recomendaciones.....	116
Capítulo VI. Bibliografía y Anexos	117
6.1 Bibliografía	117
6.2 Anexo	123

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de ubicación geográfica del área de estudio en cultivo de Caña de Azúcar, (Saccharum officinarum), Ingenio Taboga, Cañas, Guanacaste, (2019).	16
Figura 2. Etapas fenológicas de la Caña de Azúcar (Saccharum officinarum), en el que se puede observar el desarrollo del cultivo de caña de azúcar y ver en qué etapas se realizó la evaluación. Obtenido de NETAFIN, (2019).	25
Figura 3. Rangos de Kc para etapas de (Saccharum officinarum). Obtenido de Food and Agriculture Organization, 2018 Parte B Evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar.	28
Figura 4. Diagrama de flujo de proceso de imágenes para la creación de mapas.....	69
Figura 5. Mapa de ubicación geográfica del área de estudio en cultivo de Caña de Azúcar, (Saccharum officinarum), Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).	73
Figura 6. Mapa de arcillas de la sección San Carlos, Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).	76
Figura 7. Mapa de arcillas de la sección Hortigal, Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).	77
Figura 8. Mapa de arenas de la sección San Carlos, Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).	78
Figura 9. Mapa de arenas de la sección Hortigal, Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).	79

Figura 10. Mapa de capa vectorial de ubicación de puntos en sección San Carlos, Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste, (2019).	81
Figura 11. Mapa de capa vectorial de la sección Hortigal en Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).....	82
Figura 12. Mapa de NDVI del 19 de enero del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).	83
Figura 13. Mapa de NDVI del 18 de febrero del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga, Cañas, Guanacaste (2019).	84
Figura 14. Mapa de NDVI de 20 de marzo del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).....	86
Figura 15. Mapa de NDVI del 09 de abril del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).....	87
Figura 16. Mapa de NDVI de 20 de marzo del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).	88
Figura 17. Mapa de NDVI de 09 de abril del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).....	89
Figura 18. Mapa de NDWI de 2488 de abril del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).	90
Figura 19. Mapa de NDWI del 19 de enero del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga, Cañas, Guanacaste (2019).	91
Figura 20. Mapa de NDWI del 18 de febrero del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga, Cañas, Guanacaste 2019).....	92
Figura 21. Mapa de NDWI del 20 de marzo del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).	93
Figura 22. Mapa de NDWI de 09 de abril del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga S.A, Cañas, Guanacaste (2019).	94
Figura 23. Mapa de NDWI del 20 de marzo del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).	95
Figura 24. Mapa de NDWI de 09 de abril del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).....	96

Figura 25. Mapa de NDWI de 24 de abril del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).....	97
Figura 26. Correlación entre lámina agua y el NDVI-19 de enero del 2019.....	99
Figura 27. Correlación entre lámina de agua y NDVI-18 de febrero del 2019.	100
Figura 28. Correlación entre lámina de agua y el NDVI-20 de marzo del 2019.	100
Figura 29. Correlación entre lámina de agua y el NDVI-09 de abril del 2019.....	101
Figura 30. Correlación entre lámina de agua y el NDVI-20 de marzo del 2019.	102
Figura 31. Correlación entre la lámina de agua y el NDVI-09 de abril del 2019.....	103
Figura 32. Correlación entre lámina de agua y NDVI-24 de abril del 2019.....	103
Figura 33. Correlación entre lámina de agua y NDWI-19 de enero del 2019.	104
Figura 34. Correlación entre lámina de agua y el NDWI-18 de febrero del 2019.....	105
Figura 35. Correlación entre lámina de agua y el NDWI-20 de marzo del 2019.	105
Figura 36. Correlación entre lámina de agua y el NDWI-09 de abril del 2019.....	106
Figura 37. Correlación entre la lámina de agua y el NDWI-20 de marzo del 2019.	107
Figura 38. Correlación entre lámina de agua y el NDWI-09 de abril del 2019.....	107
Figura 39. Correlación entre lámina de agua y el NDWI-24 de abril del 2019.....	108
Figura 40. Correlación entre el NDVI y el NDWI-19 de enero del 2019.....	109
Figura 41. Correlación entre NDVI y el NDWI-18 de febrero del 2019.....	109
Figura 42. Correlación entre NDWI y el NDWI-20 de marzo del 2019.	110
Figura 43. Correlación entre NDVI y el NDWI-09 de abril del 2019.	110
Figura 44. Correlación entre NDVI y el NDWI-20 de marzo del 2019.	111
Figura 45. Correlación entre NDVI y el NDWI-09 de abril del 2019.	111
Figura 46. Correlación entre NDVI y el NDWI-24 de abril del 2019.	112

Índice de tablas

Tabla 1. Valores de referencia de porcentaje de composición de cultivo de Caña de Azúcar	24
Tabla 2. Fases de desarrollo del cultivo de caña de azúcar (<i>Saccharum officinarum</i>).	27
Tabla 3. Valores mínimos, máximos, promedios, desviación estándar (DE) y el coeficiente de variación (CV) de la densidad aparente en 27 perfiles de Inceptisoles de Costa Rica.	31
Tabla 4. Valores mínimos, máximos, promedio, desviación estándar (DE) y el coeficiente de variación (CV) de la densidad aparente en 27 perfiles de Inceptisoles de Costa Rica.	32
Tabla 5. Interpretación de porosidad en el suelo	33
Tabla 6. Valores normales de capacidad de campo y punto de marchitez permanente para suelos de diferentes texturas.	34
Tabla 7. Bandas del Satélite Sentinel 2.....	42
Tabla 8. Características del Satélite Landsat-8.....	44
Tabla 9. Características del Satélite Spot 4 y 5.....	45
Tabla 10. Clasificación de valor para NDVI	47
Tabla 11. Rangos de valor de estrés hídrico para NDWI	50
Tabla 12. Variables de análisis de la investigación.	60
Tabla 13. Variables y fórmulas de los modelos matemáticos utilizados en la investigación.	62
Tabla 14. Características de lotes.	64
Tabla 15. Criterios de interpretación de coeficiente "r"	72
Tabla 16. Valores de densidad aparente, densidad real y % porosidad para suelos inceptisoles, tomados en la zona de estudio, lotes San Carlos-Taboga	75
Tabla 17. Valores de densidad aparente, densidad real y % porosidad para suelos inceptisoles, tomados en la zona de estudio lote, Hortigal-Taboga.	75
Tabla 20. Parámetros de capacidad de humedad en el suelo de acuerdo a la textura calculados en Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas Guanacaste, Costa Rica.....	80
Tabla 21. Datos de coeficiente de r y r ² de la relación con humedad de suelo	98

Resumen

En Costa Rica, los cultivos han sido poco estudiados mediante el uso de la Teledetección (imágenes satelitales). La siguiente investigación pretender determinar si por medio de las imágenes satelitales con índices de vegetación de diferenciación Normalizada y el Índice de Agua de Diferenciación Normalizada correlacionadas con humedad de suelo, se puede determinar que las plantas sufran estrés hídrico ya sea por exceso de humedad o falta de la misma, con esto saber además si el agua del suelo, se relaciona directamente con el estado de las plantas. El cultivo se monitoreó durante 5 meses, en los cuales se hicieron pruebas de suelo al inicio del ensayo y las pruebas de humedad mensuales para poder correlacionarlas con los datos e imágenes Satelitales del Sentinel 2 A y B. Conjunto a esto se procesaron las imágenes y se crearon mapas indicativos de enero a mayo de vegetación (NDVI) y agua en la planta (NDVI), mostrando su mayor punto de correlación para la fecha del 09 de abril del 2019 con un r^2 de 0.62 en suelos pesados. Pero que en la correlación que se realizó entre (NDVI y NDWI) muestra un nivel de significancia alto de r^2 : 0.98 para el mes de marzo.

Palabras claves: Índice de vegetación de diferenciación normalizada, Índice de agua de diferenciación Normalizada, Densidad aparente, Humedad volumétrica, Lámina de agua.

Capítulo I. Trabajo de Investigación

1.1 Introducción

El cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en Costa Rica es una de las actividades que tradicionalmente por el desarrollo y la gama de productores que constituyen la actividad agrícola, generan una economía muy importante, al dar empleo para una parte de la población y además contribuir con el producto de consumo y calidad. (Flores, 2007)

Además de dar un gran impacto al país, el proceso de producción se ve influenciado por una amplia serie de factores ambientales las cuales inciden de una manera importante durante el ciclo de desarrollo del cultivo, algunas como temperaturas, suelos, agua, nutrición y las cosechas que prevalecen antes, durante y después del ciclo, pero también tomando en cuenta la influencia que ejerce el ser humano sobre este proceso.

De acuerdo con la gama de interés que se forma mayormente y creciente que se va dando en el sector agropecuario e hidrológico, los sistemas impulsados por la tecnología como lo son los sistemas de referencia y de distribución espacial, favorecen la obtención de datos de importancia para este sector, porque a través de este mecanismo se puede conocer y adquirir datos de evaporación, densidad de vegetación, transpiración y características de cultivos producidos en la zona deseada. Según (Vazquéz, 2013, parr.6.)

Esta investigación va enfocada en la necesidad de monitoreo del cultivo de caña de azúcar. Debido a la importancia de la realización de estudios para monitoreo de la salud de la planta durante su ciclo de crecimiento, máxime que las plantaciones de este cultivo cada vez son

más extensas y los factores ambientales en general y el manejo del hombre inciden de manera importante para su desarrollo.

Tomando en cuenta las herramientas útiles que hoy en día permite la tecnología, se busca implementar, el uso de la teledetección y de esta manera la inclusión de imágenes satelitales, sistemas de información geográficas, que ofrecen una amplia gama de información para interpretación de datos, como es el caso de uso y cálculo de Índices, indicadores de la calidad que por su amplia variedad, ponen a disposición para la investigación una gama de herramientas útiles, en casos de ejemplo Índices de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) o Índices de Agua de Diferenciación Normalizada (NDWI).

1.2 Área de estudio

El desarrollo de la investigación se llevará a cabo en Bebedero, Cañas, Guanacaste, Costa Rica, en una ubicación geográfica 10.4358848, -85.0960567, en lotes ubicados en Finca de cultivo de Caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) pertenecientes a Ingenio Taboga S.A, esta empresa cuenta con 6500 hectáreas entre fincas centrales y otra gran parte de fincas particulares y arrendadas en la cual siembran caña y arroz además se producen productos a fin, como alcohol, electricidad y proteína. Las áreas de investigación cuentan con un total de 29.77 hectáreas. Lo que corresponde a Hortigal L: 8.71ha y San Carlos I: 29.77ha.

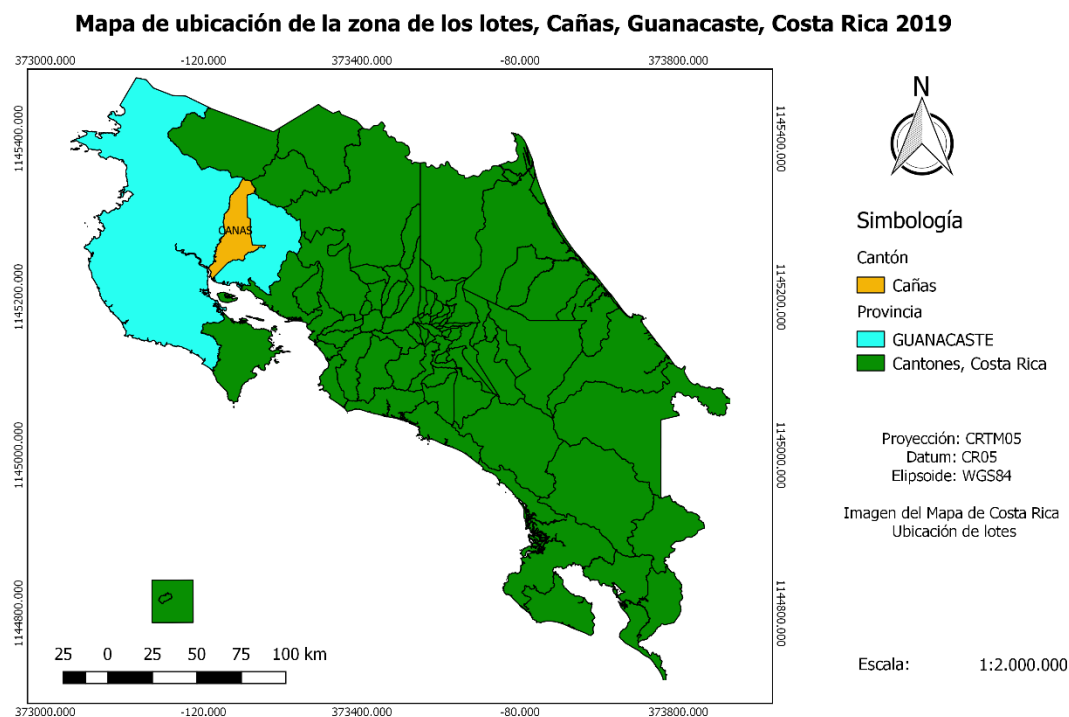


Figura 1. Mapa de ubicación geográfica del área de estudio en cultivo de Caña de Azúcar, (Saccharum officinarum), Ingenio Taboga, Cañas, Guanacaste, (2019).

En Cañas, la temporada de lluvia es opresiva y nublada. La temporada seca, se presenta humedad por las madrugadas, ventosa y parcialmente nublada al amanecer, sin embargo, es muy caliente durante todo el año.

Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 24 °C a 36 °C y rara vez baja a menos de 22 °C o sube a más de 38 °C. (Wheather Spark, 2019)

1.3 Delimitación del problema

El estrés hídrico que se genera en la Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum*) por diversos factores ambientales que acarrearán durante todo su ciclo de desarrollo.

Debido al alto grado de temperaturas que se dan en la zona de Guanacaste en época seca, los cultivos sufren mucho la necesidad de agua, caso contrario, cuando se tienen cantidad de precipitación, inviernos muy fuertes los cultivos tienden a tener problemas de estrés por exceso de agua, suelos saturados y falta de drenajes.

Se pretende que esta correlación entre la humedad del suelo y las imágenes satelitales (procesadas como NDVI e NDWI), sea de ayuda para determinar problemas de estrés hídrico que esté sufriendo la plantación, permita de esta manera monitorearla y darle seguimiento en tanto se desee y no solo a ese sector si no a la cobertura de más áreas y variedades, así como en las distintas etapas de desarrollo.

Para cumplir con el objetivo deseado se trabaja con las imágenes satelitales y el cálculo de los índices (NDVI y NDWI) para encontrar si existe una correlación o predicción entre la humedad de suelo y los índices que dé respuesta a la salud de la planta.

1.4 Justificación

La investigación tiene la intención de generar información, mediante el uso de la tecnología y con programas desarrollados que facilitan la obtención de información a partir de recursos existentes ya creados y conocidos, para agilizar procesos llamados también agricultura de precisión. En este caso se busca la evaluación de un sistema que permita el conocer la necesidad que sufren las plantas por falta de agua o exceso de ella. Es importante tomar en cuenta que se aporta información útil para una opción de identificación del estrés indicativo en el follaje.

La información aporta un valor en cuestión de conocimiento a una nueva variedad de cultivo que recién se establece en la zona y para la cual la información a su respuesta en

desarrollo aún es poca, generando una inquietud para poner en práctica proyectos para la determinación información aprovechable científicamente, tomando en cuenta la teledetección y Sistemas de Información Geográfica como herramienta tecnológica y muy oportuna.

Según (Lutz, 2017), En el cultivo de caña de azúcar, sus características, ubicación y factores medio ambientales, influyen en que la planta se adapte ante cambios o que a la vez se vea afectada en su desarrollo, por lo que se ha llegado a tomar en cuenta evaluar los factores medio ambientales y climáticos que puedan influir en su producción

Esta evaluación ayudaría a saber mediante el estudio de las imágenes y los cálculos de Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) e Índices de Vegetación de Diferenciación Normalizada (NDVI) y la necesidad que el cultivo requiera por efecto del estrés representativo en el follaje, en el que el NDWI representa la cantidad de humedad que poseen las plantas.

La Caña de Azúcar, es uno de los principales cultivos producidos en la zona de Guanacaste, conocido por sus altas temperaturas en épocas de verano, dan paso a la investigación de cómo mitigar la problemática de las altas evapotranspiraciones de los cultivos y al deterioro constante por esta misma.

Uno de estos problemas son las altas temperaturas. Se muestra el estudio que se realizó con un satélite para determinar las temperaturas que han sido cambiantes en Costa Rica. Debido a las sequías en 2019, Costa Rica ha recibido 75% menos de lluvias, acompañado del fenómeno del niño que inició en noviembre 2018, con este mecanismo de monitoreo satelitalmente va reforzando la información que se obtiene en campo con respecto de la

humedad y el estrés que puedan presentar las plantas, mediante mapas de temperaturas (ver en Anexo 20). (NASA Ciencia Beta, 2019)

El aporte que generaría esta investigación, sería la utilización en una empresa como Ingenio Taboga, la cual es productora de Caña de Azúcar le brindaría la oportunidad de analizar datos para sistemas de riego, mediante la información generada por el NDVI y NDWI. Estas informaciones podrían ser aplicables a todo el sector en el que se utiliza el cultivo, incluso analizando datos de otras variedades y sería otra fuente generadora de información aparte del que ya se utilice.

La investigación permite un análisis profundo y recolección de datos de campo que muestren un indicador de afectación del cultivo.

Es importante tomar en cuenta que la recolección de datos provee una opción de identificación del estrés que se genera en la vegetación. Esta investigación, no afecta el medio ambiente debido a que se utilizan pequeñas muestras de suelo y análisis de este y lo demás se realiza mediante programas e imágenes satelitales con bandas espectrales que brinden algún tipo de información con respecto a la coloración de las plantas.

1.5 Situación actual del conocimiento del arte

La agricultura de precisión ha venido a cambiar las aplicaciones y a innovar una gran parte importante de la agricultura. Algunos estudios realizados alrededor del mundo han mostrado pequeñas y grandes fracciones del avance de esta tecnología y como se ha ido implementando a lo largo del tiempo. Lo más importante es que se han realizado diferentes estudios de situaciones que acontecen en la agricultura, una de las importantes que se tienen en el estudio de estas investigaciones es el uso del Balance Hídrico y como se le ha dado un uso para la

climatización, situaciones hídricas o hidrológicas, suelo, mecanización y además del uso de imágenes satelitales que vienen a darle un apoyo, a reforzar la información que acontece en el planeta tierra.

El proyecto realizado por (Balbontin, Calera, Campos, González, y López, 2009). Balance Hídrico y Estrés en la Cubierta Vegetal Utilizando una Secuencia Multitemporal de Imágenes. Caso de Estudio: Cultivo de Trigo en Secano. El objetivo principal del estudio fue estimar la evapotranspiración, así como el Estrés Hídrico en las cubiertas vegetales. El procedimiento se basa en una escala diaria, en la cual se utilizó una secuencia Multitemporal con imágenes satelitales o bandas multiespectral debido a que el clima en la zona se define caracteriza como semiárido y siendo muy concurrente en la afectación de los cultivos sufriendo estrés hídrico. Lo que genera una relación de similitud ya que ambos proyectos están enfocados en Gramíneas y en determinar si existe un estrés hídrico en el cultivo.

El trabajo final de graduación de (Aguirre, 2012). “Desarrollo de un programa de cómputo para análisis de imágenes de satélite con fines de predicción hidrológica” Se relaciona con el presente trabajo se hace uso de imágenes satelitales para fines hidrológicos.

El objetivo principal de ese proyecto fue desarrollar una herramienta computacional, de uso sencillo, que ayude en el análisis de imágenes satelitales infrarrojas (ISI) y fundamentalmente en el pronóstico de eventos extremos de precipitación.

Con el uso de ISI se busca la manipulación de las imágenes que de hecho se realizaron las pruebas pertinentes con las imágenes, simulándose un evento extremo de lluvia para verificar la distribución de los píxeles asociados a las lluvias, lo que viene a ser de importancia puesto con el presente proyecto que se está realizando se pretende evaluar los píxeles de las imágenes que se obtienen de un satélite en este caso Sentinel, sin embargo el trabajo anterior

hizo uso de imágenes Landsat utilizando bandas infrarrojas para detección de humedad lo mismo que se desea en este proyecto pero con satélite diferente, en la parte de resultados el proyecto de Karys indica que se programaron 3 técnicas destinadas a la estimación de precipitación de imágenes satelitales infrarrojas y las correlaciones existentes entre componentes de los píxeles de las imagen y la cantidad lluvia en mm/h en lugar físico representado por pixel.

Debido a la gran utilidad que tienen los estudios de necesidades hídricas para los cultivos se han realizados estudios para poner en práctica métodos como el de Balance Hídrico. Costa Rica tiene dos estaciones bien definidas, el invierno y el verano, sin embargo, Guanacaste es una zona donde se llega a tener veranos muy fuertes e inviernos muy húmedos o incluso muy secos (donde la precipitación es mucho menor comparada a otros años). Por esta razón el factor temperatura, juega un papel muy importante para la caña de azúcar. En épocas muy húmedas que datan desde el mes de mayo a noviembre y calurosas que van en época de verano de diciembre hasta mayo, con radiaciones muy fuertes y aumento de la evapotranspiración que afectan la humedad del suelo donde se establecen los cultivos.

En el proyecto que realizó (Programa Hidrológico Internacional (PHI); UNESCO, 2007) un ejemplo de ello con el tema “Balance Hídrico Superficial de Costa Rica 1970-2002” para las cuencas de Costa Rica menciona que”. El período para el cálculo del balance hídrico fue de 33 años, de 1970 a 2002. El balance se realizó en forma anual, considerando despreciable las variaciones de almacenamiento. El cálculo del balance se realizó para cada una de las 34 cuencas principales del país”.

Como medio para determinar mediante los datos meteorológicos de precipitación, la humedad que se encuentra en el suelo y como esta misma se ha distribuido en un área

determinada que se desee analizar. En el presente trabajo de investigación se pretende generar un balance hídrico para la correlación con los datos que arroje el NDVI y el NDWI de las imágenes satelitales de Sentinel. Es por esto que este trabajo anterior hace mención al desarrollo de balance hídrico en las cuencas de nuestro país y en este se pretende generar un BH cada semana.

Por otra parte, también se obtiene información relacionada a la teledetección o imágenes satelitales, las cuales los satélites toman fotos con bandas espectrales especializadas desde el espacio con capacidades altas cuya función es realzar la vegetación en función de su respuesta espectral y atenuar los detalles de otros elementos como el suelo, la iluminación, el agua, etc.... Se trata de imágenes calculadas a partir de operaciones algebraicas entre distintas *bandas espectrales* afirma mediante la diferencia entre la *reflectancia* de las bandas 4 (infrarrojo cercano) y 3 (visible – rojo) dividido por la suma de estas dos bandas de *reflectancia*. (Ramos, 2017, pág. 1)

Es por esta razón que esta investigación busca hacer una mezcla de estas bases de programas que brindan datos de utilidad con el propósito de unificarlas y evaluar si la mezcla de la información es óptima para fortalecer la parte suelo-humedad-planta.

1.6 Objetivos de investigación

1.6.1 Objetivo General

- Estudiar la relación entre el Índice de Vegetación de Diferenciación Normalizada (NDVI), el Índice de Agua diferencia Normalizada (NDWI) y el agua disponible en el suelo en el cultivo de Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum*) como herramienta para el manejo del requerimiento de humedad del cultivo.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Determinar las características físicas del suelo mediante pruebas en campo para la obtención de requerimientos de riego en el cultivo de caña de azúcar.
- Calcular el índice de vegetación de Diferenciación Normalizada (NDVI) y el Índice de Agua de Diferenciación Normalizada (NDWI) mediante combinación de bandas espectrales de imágenes satelitales para la obtención del mismo.
- Evaluar la correlación entre el NDVI y el NDWI con la humedad de suelo en el cultivo mediante parámetros estadísticos para la obtención de un resultado comparativo.

Capítulo II. Marco Teórico Referencial

2.1 Condiciones Generales del Cultivo Caña de Azúcar

En el área de las gramíneas se encuentra una planta llamada Caña de azúcar. La Caña de azúcar o como su nombre científico lo menciona (*Saccharum officinarum*) es una planta larga y erecta, la misma muy parecida al sorgo y al maíz, lo que marca su diferencia es que esta planta en su tallo posee un cumulo rico en sacarosa, la cual esto producido durante su ciclo mediante de absorción de luz solar, realizando su proceso de fotosíntesis y llenando sus entre nudos de sacarosa. La sacarosa es lo que al final de su ciclo productivo se extrae y se convierte en azúcar en las grandes industrias, que además también obtienen subproductos de la caña. (Díaz y Portocarrero, 2002)

La estructura física de la planta está compuesta por un tallo erecto, el cual se le llama la parte sólida donde se encuentra la fibra y además su parte líquida compuesta por agua, sacarosa y otros componentes que esta posee. La variabilidad de esta planta se compone de acuerdo a la variedad (familia) a la que pertenezca y una serie de agentes medio ambientales que van con el paso de su ciclo productivo a ser responsable de su producción de azúcar. (Perafán, 2009).

Tabla 1. Valores de referencia de porcentaje de composición de cultivo de Caña de Azúcar

Composición de planta	Porcentaje
Agua	73-76%
Sacarosa	8-15%
Fibra	11-16%

Fuente: Perafán, (2009).

2.2 Etapas fenológicas del cultivo

El desarrollo del ciclo vegetativo de la caña de azúcar dependerá mucho de la influencia de los agentes medio ambientales y la variedad que dicha planta posea. Desde la siembra hasta la cosecha pueden rondar unos 14 a 17 meses. Pasando por cuatro etapas vitales: emergencia, macollamiento, desarrollo de sus tallos y punto de maduración y además tomando en cuenta que en el ciclo llamado (soca); en esta etapa la planta ya ha sido cosechada y se espera el retoño para un nuevo ciclo productivo (rebrote, crece, maduración). (Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, 2015).

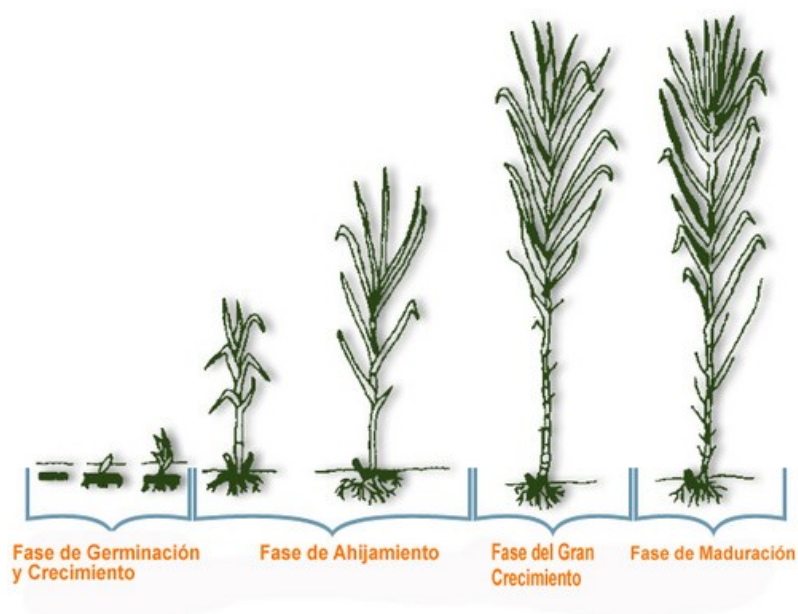


Figura 2. Etapas fenológicas de la Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum*), en el que se puede observar el desarrollo del cultivo de caña de azúcar y ver en qué etapas se realizó la evaluación. Obtenido de NETAFIN, (2019).

Conocer las etapas fenológicas de un cultivo es una de los principales detalles en los que se deben de enfocar cuando se trabaja en la agricultura, debido a que los cultivos son seres

vivos en los que tienen etapas de crecimiento y desarrollo; nacen, crecen se reproducen y mueren; sin embargo, todos los cultivos tienen tiempos establecidos en los que esto sucede.

La caña de azúcar en caso particular llega a su etapa de cosecha en 11 meses y durante todo ese proceso para atrás conlleva un ciclo de labores para implementar e impulsar su desarrollo.

Es de esta manera como vienen a influir en estos desarrollos los factores que se encuentran anuentes ya sea a inferir de manera positiva o negativa en los ciclos de cultivos, en este caso en caña de azúcar. Por esta razón es que siempre se busca la actualización y constante monitoreo del desenvolvimiento de los cultivos para poder aprovechar mejor las labores que se le realizan y a las etapas en las que estas son necesarias. Como se muestra en la tabla 2. Aplica para cuando es necesario conocer su etapa de absorción del fertilizante, para poder nutrir la planta y realizar las labores para que estos elementos sean aprovechados, también etapas donde el riego es aún más fundamental que otros, como combatir plagas y en que etapas de desarrollo sufren mayor incidencia y ataque de las mismas. Por otra parte, también tomar en cuenta los cultivares o variedades a establecer y por último la época adecuada en la que se debe cosechar para un máximo aprovechamiento de los azúcares.

En la siguiente tabla, muestra cómo se distribuye el ciclo de cultivo y el manejo que se le da en campo como parte de los cuidados principales de la caña de azúcar.

Tabla 2. Fases de desarrollo del cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*).

Fases	Factores de Manejo	Efectos observados
I. Emergencia y macollaje	Sistematización y preparación de suelos, época de plantación y/o corte, elección de cultivares; selección y tratamiento de semilla; laboreo etc.	Establecimiento de una alta población de tallos;
	Diseño de plantación, surcos de base ancha.	Aumento del porcentaje y velocidad de Brotación
	Riego.	Inicio temprano del macollaje
	Fertilización	Mejor distribución espacial
	Plagas y enfermedades	Cierre temprano y rápido de inicio de la fase siguiente
II. Crecimiento activo	Fertilización (aplicación en fase I)	Altas y sostenidas tasas de crecimiento del cultivo
	Riego.	Asegurara una óptima disponibilidad hídrica y nutricional
	Plagas y enfermedades	Mantener una elevada población de tallos
	Malezas (ejecución fase I)	Máximo aprovechamiento de las condiciones ambientales del verano; Lograr un inicio temprano de la fase siguiente
III. Maduración	Elección de cultivares (distribución o tipo de madurez)	Máxima expresión del potencial azucarero de los genotipos disponibles
	Regulación del riego y fertilización en Dosis y época adecuada	Inducir una reducción de la tasa de elongación de los tallos
	Maduración química	Aumentar la tasa de almacenamiento de sacarosa
		Mantener la actividad fotosintética
		Disminuir el contenido hídrico de los tallos
IV. Cosecha	Adecuada planificación de la zafra	Mejorar la calidad fabril de la materia prima
	Optimizar la eficiencia de los sistemas de cosecha	Homogenizar la maduración de los distintos cultivares y edades de los cañaverales
	Minimizar las pérdidas de azúcar	Lograr bajos niveles de estacionamiento batey de residuos de cosecha y pérdidas de materias primas
	Capacidad para reordenar el programa de cosecha por efectos climáticos	Despuntar en un óptimo nivel
		Minimizar las pérdidas de azúcar y materia por efectos climáticos

Fuente: En ciclo y desarrollo de la caña de azúcar se puede observar en sus etapas marcadas de crecimiento y comportamiento. En Aguilar, (2015). Ficha Técnica del Cultivo de Caña de Azúcar. pág. 9

2.3 Coeficiente de Cultivo

Para el monitoreo de las condiciones climáticas que ocurren constantemente a través de cambios que sufre el medio. Estos datos de consumo de agua y/o evaporación pueden ser estimados mediante los datos meteorológicos, los cuales van a desencadenar una serie de variables que se necesiten para llevar un control sobre el medio y lo que sucede, así es el caso de datos como; (temperatura, velocidad de viento, radiación solar y humedad relativa. (Comisión Nacional de Riego-Centro de Investigación y Transferencia de Riego Agroclimatología (CITRA), 2017, párr. 1.)

Las diferencias en evaporación y transpiración entre los cultivos de campo y el pasto de referencia pueden ser integradas en un coeficiente único del cultivo (K_c) o separadas en dos coeficientes: un coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) y un coeficiente de evaporación del suelo (K_e), por lo que $K_c = K_{cb} + K_e$. El procedimiento a seguir dependerá del propósito de los cálculos, la exactitud requerida y la información disponible. (Food and Agriculture Organization, 2018)

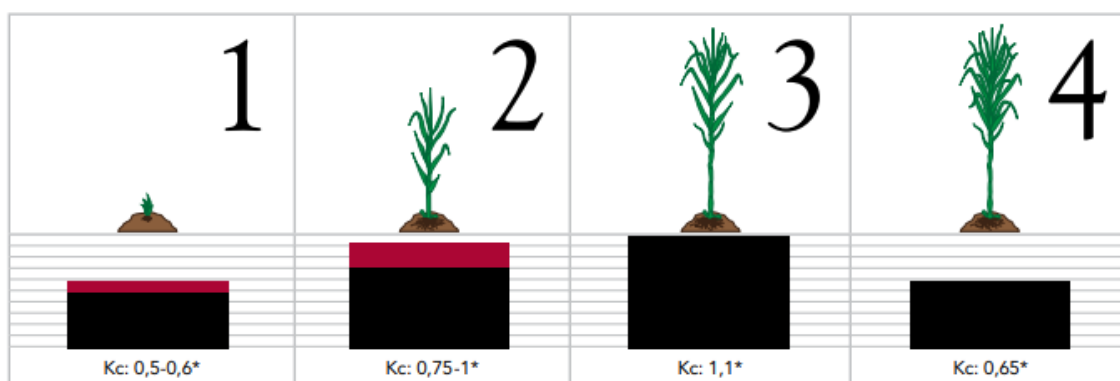


Figura 3. Rangos de K_c para etapas de (*Saccharum officinarum*). Obtenido de *Food and Agriculture Organization*, 2018 Parte B Evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar.

2.3 Problemas de estrés hídrico en cultivo

El agua es un recurso vital para todo ser vivo. Hablando de las plantas, es de vital importancia para su desarrollo, la falta o déficit de agua viene a crear una fuerte afectación cuando llegan a faltar por un periodo de tiempo, convirtiéndose en una fuente de estrés hídrico para el cultivo. Sin embargo, las plantas han desarrollado la capacidad de tolerar la variabilidad de agua que tengan, van desde puntos muy extremos; sin agua, o de acuerdo a la cantidad que posean, sea medio o alto. Tiende a crearse una adaptabilidad al medio. (Moreno, 2009)

En el año 1997 se sufrió un cambio climático intenso, el cual se convirtió en niño. Se pudo presenciar un incremento en los niveles de temperatura ambiental y disminución de las lluvias. Esta alta de temperaturas, provocó que las plantas sufrieran un fuerte estrés hídrico por la necesidad de no contar con agua suficiente para su desarrollo lo que trajeron además problemas fitosanitarios (enfermedades y plagas), evidenciándose también daños en las hojas por el exceso de calor (quemaduras), y deterioro de las plantas. (Angúlo, 1999)

Debido a la preocupación de lo que aconteció en esta época se dieron a la tarea de investigar las plantaciones afectadas por el estrés hídrico, se requirió una evaluación o diagnostico en el área de Cañas y Abangares para determinar la severidad del asunto.

Se tomaron en cuenta los siguientes, cuando una planta entra o se encuentra en estado de estrés hídrico.

Asociados a la afectación del medio en la que se ven influenciadas las plantas hacen que están floreen y su desarrollo o su ciclo se vea alterado. Estos factores son principalmente las temperaturas, humedad de suelo, luz y fertilidad del suelo donde se encuentre. (Cháves, 2017)

2.5 Capacidad de retención del suelo

Cuando se habla de retención de agua, viene acompañado de variables que van a propiciar el almacenaje de agua en el suelo, de esta manera que las plantas puedan disponer en diferentes de la capacidad de moverse de las raíces, que tan profundas pueden llegar a ser y de en qué tipo de suelo se dispongan. De esta manera, cuando se programa un riego se tomarán en cuenta las variables para ajustarlo a las variables del suelo y necesidades de la planta. (TRAXCO, 2014)

2.4 Requerimientos Fisiológicos

Para el cultivo de caña de azúcar y su supervivencia en el desarrollo, radica en tener suelo con capacidad de dren en caso de tener influencia de excesos de agua y además mantener el contenido de materia orgánica y nutrimentos para fortalecer el desarrollo de la planta. (Lutz, 2017)

Este cultivo tiene la gran ventaja de que no es un cultivo exigente a suelos, debido a que se adapta bien y de acuerdo a su variedad con respecto a tipos de suelo ya sean arcillosos o arenosos. La necesidad de adaptarse a los tipos de suelos es debido a que poseen un sistema radicular que en su medida ronda el metro, por lo que requieren una aireación suficiente. De esta manera para evitar problemas radiculares, es importante que se pueda drenar bien el agua, cuidando los valores de pH, que estén al menos cerca de la neutralidad aunque toleran de 4 a 10; salinidad y/o alcalinidad. (SPCI-Caña de Azúcar, 2011)

2.5 Clasificación taxonómica de suelos

La clasificación de los suelos, viene acompañado de varias estructuras, texturas cada una son influenciadas por ubicación, en un suelo se pueden encontrar varias texturas juntas y mezcladas.

2.5.1 Textura

Se le conoce a textura cuando en los suelos hay mayores cantidades en tamaño y rangos de las partículas del suelo.

2.6 Orden de suelos estudiados en esta investigación

2.6.1 Inceptisoles

Estos suelos son caracterizados por estar en zonas con alto volcanismo activo. Son de alto contenido en arcilla. Para este tipo de texturas hay predominancia de francos arcillosos siendo los más fuertes en su campo.

Tabla 3. Valores mínimos, máximos, promedios, desviación estándar (DE) y el coeficiente de variación (CV) de la densidad aparente en 27 perfiles de Inceptisoles de Costa Rica.

Inceptisoles						
pa Mg m-3						
Prof.	Horizontes				DE	CV
cm.	No.	Mín.	Máx.	Prom		%
0-20	35	0,67	1,71	1,21	0,27	22,3
20-40	17	0,83	1,7	1,26	0,3	23,78
40-60	19	0,85	1,79	1,19	0,24	20,25
60-80	25	0,85	1,7	1,28	0,22	17,22
80-100	24	0,90	1,6	1,21	0,16	13,21

Fuente: Información de estudios de características de suelos inceptisoles en Costa Rica. En Alvarado y W, (2005), Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica, obtenido de página www.mag.co.cr

2.6.2 Vertisoles

Estos suelos se caracterizan por tener a simple vista una particularidad de ser oscuros y arcillosos. Cuando los suelos están secos tienen a quebrantarse formando grietas y se cierran cuando se dan un cambio. Son muy dados en las zonas de Guanacaste. (WILDING L.P., 1988)

Tabla 4. Valores mínimos, máximos, promedio, desviación estándar (DE) y el coeficiente de variación (CV) de la densidad aparente en 27 perfiles de Inceptisoles de Costa Rica.

Vertisoles						
pa Mg m-3						
Prof.	Horizontes				DE	CV
cm.	No.	Mín.	Máx.	Prom		%
0-20	27	0,98	1,78	1,29	0,21	16,32
20-40	16	0,92	1,80	1,35	0,32	23,63
40-60	15	1,05	1,83	1,38	0,26	18,91
60-80	15	1,09	1,95	1,35	0,25	18,57
80-100	15	1,06	2,00	1,51	0,30	19,90

Fuente: Información de estudios de características de suelos Vertisoles en Costa Rica. En Alvarado y W, (2005). Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica, obtenido de página www.mag.co.cr

2.6.3 Porosidad del suelo

La porosidad de un suelo se describe como la parte de suelo que no está ocupada por ninguna partícula. En su estado natural o más sencillo, es el espacio que está ocupado por aire o por agua.

Se dice que para que el suelo tenga una buena retención de agua, lo más prudente es que la porosidad del suelo ronde como mínimo el 40% y como máximo el 60%, esto se debe a que valores más bajos de los que se presentan anteriormente pueden generar asfixia en las raíces de las plantas, o contenidos de agua retenidas muy bajas, inclusive se pueden provocar las dos variables según (Área de Edafología y Química Agrícola Facultad de Ciencias, 2005)

Se puede representar con la siguiente formula.

$$\rho = \left(1 - \frac{d_a}{d_r}\right) * 100 \dots (1)$$

ρ : Porosidad (%)

d_a : Densidad aparente

d_r : Densidad real

Tabla 5. Interpretación de porosidad en el suelo

Porosidad total (%)	Interpretación
30 – 40	Baja
40 – 50	Media
50 - 60	Alta
> 60	Muy alta

Fuente: Como se puede interpretar la porosidad en el suelo de acuerdo a su porcentaje. En Flores & Alcalá, (2010) Manual de Procedimientos Analíticos Laboratorio de Suelos. Obtenido de <http://www.geologia.unam.mx>

2.6.4 Capacidad de Campo de un Suelo (CC) y Punto Marchitez Permanente (PMP)

Cuando el suelo llena sus poros en totalidad de agua se dice que el suelo está en su capacidad de campo (CC), esta agua o parte de ella se encuentra disponible para las plantas. En el caso cuando el suelo está totalmente drenado y las plantas no pueden absorberla se dice que están en punto de marchitez permanente (PMP). Estos datos pueden expresarse en porcentaje de peso suelo seco. (Técnico Agrícola, 2013)

$$CC = \frac{P_{sh}}{P_{ss}} \dots (5)$$

CC: Capacidad de campo %

P_{sh} : Peso suelo húmedo (g)

P_{ss} : Pesos suelo seco (g)

Tabla 6. Valores normales de capacidad de campo y punto de marchitez permanente para suelos de diferentes texturas.

Textura	Capacidad de campo %	Punto de Marchitez Permanente %
Arenoso	5 – 15	3 - 8
Franco arenoso	10 – 20	6 - 12
Franco	15 – 30	8 - 17
Franco arcilloso	25 – 35	13 - 20
Arcilloso	30 – 70	17 - 40

Fuente: Porcentajes que se encuentran en los suelos de acuerdo a su orden. En Agro noticias (2012). Información Capacidad de campo y Punto de marchitez permanente. Obtenido de <https://agronoticias2012.blogspot.com/2016/08/punto-de-marchitez-permanente-capacidad.html>

2.7 Densidades del suelo

Estas mediciones son utilizadas en los estudios de suelo, cuando la necesidad de conocer el contenido de poros que este pueda poseer. Un punto a tomar en cuenta, es que la variabilidad de los suelos es ampliar y algunos por su composición poseen más o menos porosidad.

2.7.1 Densidad Aparente

La densidad aparente consta de una relación de medición del peso del suelo seco o sustrato por unidad de volumen. Es útil cuando se requiere hacer cálculos nutricionales, se determina el peso de suelo seco mediante un análisis en laboratorio. También se puede determinar el grado de compactación que es vital para procedimientos en campo. (Hernández, 2018)

En las siguientes fórmulas, se puede observar el desarrollo de cada una y como se utilizaron en los cálculos de procedimientos en las muestras de suelo que se tomaron en campo.

Determinar densidad aparente Fórmula 1. (Rojas & Sáenz, 2018)

$$Da = \frac{Pss}{Vol\ cilindro} \quad \dots (6)$$

Da: Densidad aparente (g/cm³)

Pss: Peso suelo seco (g)

Vol. cilindro: Volumen del cilindro (g/cm³)

De acuerdo con los datos de resultados que en la densidad aparente determine.

2.7.2 Densidad real

La densidad real del suelo, se puede entender cómo, el peso del material sólido del que está compuesto el suelo (volumen de partículas sólidas en gr/ml). La variabilidad de las partículas de suelo, es muy constante indica que sus rangos se mantienen en 2.60 a 2.75 gr/ml, excluyendo los suelos orgánicos. Además tiene 3 puntos definidos en los que se compone la densidad real, cantidad de mineral, materia orgánica e inorgánica. (Fragoso, y otros, 2010)

$$Dr = \frac{Pss}{V\ sólidos} \quad \dots (7)$$

Dr.: Densidad real %

Pss: Peso suelo seco (g)

V. sólidos: Volumen de sólidos (m³)

Se habla que en cuanto al agua útil disponible para la planta en niveles de capacidad de campo se encuentra agua capilar más agua ligada. Además, el agua ligada, por si sola es la de marchitamiento. En caso de que los suelos tengan problemas de permeabilidad y sean difíciles de drenar es donde se va generar un problema en el desarrollo de las raíces de las

plantas aunque el agua se encuentre disponible ya que no generar la suficiente oxigenación para el sistema radicular. (Ibáñez, 2006)

Es por esta razón que los suelos son parte fundamental de los cultivos, en el caso de humedad y la retención que los suelos puedan tener de humedad y el agua disponible que se encuentre en el suelo para ser absorbido por las plantas. En la tecnología se vienen implementando una serie de información en la que buscar lograr monitorear el crecimiento y desarrollo de las vegetaciones o bien también el comportamiento del suelo. Este es el caso de la teledetección que combinada con el monitoreo desde el espacio mediante satélites también puede ser usado desde la tierra con imágenes multiespectral los cuales ofrecen un buen apoyo al monitoreo de vegetación, suelos, clima y demás.

2.8 Humedad del suelo

La humedad de suelo es una de las más importantes para la subsistencia de las plantas y cualquier ser vivo. Se encuentran sostenidas por suelo o cualquier sustrato para su crecimiento, donde también fluye el agua que le da vida y los nutrientes de los que se alimenta.

La humedad, se mueve en el suelo donde provee alimento y que explica su alojamiento en el suelo, según (SACSA, 2018) menciona que se le llama el agua libre; los suelos poseen poros de mayor y menor tamaño. En los más grandes se sitúa el agua, el cual permanece ahí en movimiento, ya que la gravedad permite que esta pueda bajar a las profundidades del suelo y subir mediante capilaridad, sin ninguna dificultad.

2.8.1 Humedad gravimétrica

Relación que se obtiene entre la fracción masa líquida y masa sólida del suelo (Cátedra de Cereales y Oleaginosas Departamento de Producción Vegetal Facultad de Ciencias Agropecuarias Universidad Nacional de Córdoba, 2019)

$$W = Ma/Ms \dots (1)$$

Ma: Masa de agua

Ms: Masa se suelo seco (gr).

Normalmente se expresa en %

$$W = \left(\frac{Ma}{MS} \right) * 100 \dots (2)$$

Lo que indica que un suelo con 20% de humedad contiene 20 gr de agua en 100 gr de suelo.

2.8.2 Humedad volumétrica

Es una relación entre una fracción líquida de suelo y el volumen de la muestra.

$$Vol = Va/Vs \dots (3)$$

Puede ser expresada en % si se multiplica por 100.

Un suelo con una humedad volumétrica del 20% contiene 0.2 cm³ de agua en 1 cm³ de suelo.

2.8.3 Lámina de agua en el suelo

Conociendo datos como CC y PMP, y la densidad aparente, se puede calcular para profundidad de suelo dada la cantidad de agua disponible para la planta que se puede almacenar en esa capa del suelo.

$$La = \frac{(CC-PMP)}{100} * Da * prof \dots (4)$$

La: Lámina de agua (mm)

CC: Capacidad de campo (en base a peso)

PMP: Punto de marchitez permanente (en base a peso)

Da: Densidad aparente (kg/m³)

Prof.: Profundidad de suelo (mm)

2.8.4 Agua en el suelo

El ciclo del agua implica un cambio continuo de grandes masas de agua de un estado físico a otro y su transporte de un lugar a otro. Al volumen de agua que se desplaza de un depósito a otro a lo largo de un año se llama balance hídrico global.

El ciclo hidrológico se da debido a movimiento del agua mediante la evaporación y posterior, superficial y subterráneamente. Esto se prolonga mediante las precipitaciones que dan paso a la circulación del agua en el suelo devolviendo el agua a las fuentes y recreando el proceso. (Ordoñez, 2011)

Cuando se habla de continuidad o de balance hidrológico, se somete a una expresión muy importante, debido a que normalmente es una ecuación complicada con falta de datos traídos del campo y de la variación espacial que se pierde en almacenamientos de agua. (Ordoñez, 2011)

Las salidas del agua cuando se realizan procesos como el manejo del agua e incluso cuando se toma en cuenta cálculos como balances hídricos o toma de humedades de suelo directamente con sensores es donde se debe tomar en cuenta el agua del suelo y que pasa con esas humedades que se encuentra en los poros de los suelos y de las cuecas que Según

Espinoza (1989) incluyen la evaporación desde la superficie y salida de corrientes de agua superficial y subterránea.

Tienen lugar a:

- a) Una parte se evapora.
- b) Otra parte es aprovechada por la vegetación.
- c) Otra parte es interceptada por vegetación.
- d) Otra parte escurre por la superficie.
- e) Otra parte se infiltra en el subsuelo.

Pero no solamente se pueden proveer información para lluvias, si no que las aguas que se aplican en el suelo cumplen un papel importante para el manejo de los riegos y determinar cuándo se requiere otro riego y si las plantas cuentan con el agua disponible necesaria para la absorción.

Para este en el cual según (Glaría y Kouro, 2001) Los sensores se utilizan en el suelo para poder detectar la cantidad de humedad que hay en el suelo. De esto se parte la conductividad que muestre, puede ser alta o baja, todo va a depender de la cantidad de humedad que tiene el suelo. Para determinar la humedad se ponen los sensores en el suelo, se toman varias medidas. La manera de tomar es poniendo 2 electrodos separados por distancias cortas para luego someterlos a una diferencia potencial, por lo que, de esta información a utilizar, la humedad del suelo por sí solas medidas con sensores de humedad de suelo son los indicados.

2.9 La Teledetección

Es la manera en la que se adquiere información mediante un flujo de energía de un sensor hacia un objeto sin necesidad de estar en contacto directo, esto aplica para el sensor y la superficie, ejemplos de ellos se tienen (satélites, el ojo humano) entre otros. (Araya, 2009).

Para efectos prácticos de relacionar información espacial de uso importante para el desarrollo de proyectos y visualización de sucesos en la tierra que proveen los satélites artificiales.

Según (Valenzuela, 2005) De acuerdo a la información de composición de cada satélite, llevan en sí, fuentes de poder que les permite obtener la información necesaria. Entre estos objetos funcionales, poseen: antenas, Emisoras y transmisoras, el recolector de la información, el control de accionamiento y la fuente de poder.

El caso más habitual consiste en que esa fuente sea el Sol (Labrador, Évora, y Arbélo, 2012).

1. La radiación solar que viaja en busca de una superficie.
2. Intersección de la radiación solar con el objeto, va ligado de las características que el objeto posea y lo que refleje.
3. El sensor del satélite obtiene la información.
4. Esta energía se transforma en la radiación reflejada por la atmósfera
5. La información tomada por el sensor es enviada y recibida en una estación donde se convierte en imagen.
6. La imagen es procesada para ser interpretada (visual y digitalmente)

7. La imagen final se utiliza para poder obtener conocimiento de áreas de importancia de estudio, para resolver problemas y realizar mejoras.

De acuerdo a la información anterior, al espacio se han enviado una serie de satélite con el propósito de capturar esa información de las superficies de la tierra para poderlas procesar y analizar. Unos de los satélites que se enviaron al espacio para la recolecta de información es el Sentinel 2, el cual es una pareja de satélites llamados 2A y 2B, los cuales proporcionan imágenes ópticas multiespectral que dan paso a un monitoreo constante a la vegetación y permite que este proceso sea de alta resolución. (Agromático, 2018)

Los satélites que se mencionan en la información siguiente, son uno de los satélites que actualmente se encuentran en órbita y poseen páginas donde se permite la obtención de las imágenes corregidas gratuitamente y además poseen una buena resolución 30 x 30, 20 x 20 metros y otros más cercanos aún de 10 x 10 metros de distancia, por lo que estos satélites proveen la información más accesible y de calidad.

2.10 Satélites y características

2.10.1 Sentinel 2 A y B

Son satélites que están situados en una misma órbita, uno colocado antes que otro. Ambos colocados con la intención de monitoreo de la tierra mediante la toma de imágenes satelitales a una distancia más cercana de 10 x 10 metros. Los mismos poseen una cámara especial en la que sus fotografías son de bandas espectrales múltiples, son tomadas para diferentes usos en el monitoreo de la tierra.

Tabla 7. Bandas del Satélite Sentinel 2

Bandas	Resolución espacial (m)	Resolución espectral (nm)
Bandas 1 (Aerosol)	60	443
Banda 2 (Azul)	10	490
Banda 3 (Verde)	10	560
Banda 4 (Rojo)	10	665
Banda 5 (NIR)	20	705
Bandas 6(NIR)	20	740
Banda 7 (NIR)	20	783
Banda 8 (NIR)	10	842
Banda 8 ^a	20	805
Banda 9 (Vapor de agua)	60	9945
Banda 10 (Orrus)	60	1375
Banda 11 (SWIR)	20	1610
Bandas 12 (SWIR)	20	2190

Fuente: Bandas multiespectral del satélite Sentinel. En Educación Forestal, (2017). Educación Forestal en Almazcara. Obtenido de <http://almazcara.forestry.es/2017/06/bandas-satelite-sentinel-2.html>

Este satélite está programado con un programa de escaneo en la cual a lo largo de su trayectoria logra proyectar un haz de 290 kilómetros de ancho lo que permite tener altos rangos espectrales y geométricas Además cuenta con bandas multiespectral las cuales son bandas focales, con 12 detectores y 450000 pixeles a lo largo y ancho de su foco; visible, infrarrojo cercano y un infrarrojo de onda corta. (esa, 2015)

Si en el transcurso de su órbita algún pixel se viera dañado por cualquier razón tiene la capacidad de ser remplazado, debido a su sistema de almacenamiento de pixeles redundantes. Las diferentes bandas espectrales se encuentran aisladas para un mejor trabajo, estos son separados por filtros especiales para su mejor manejo. (esa, 2015)

2.10.2 Resolución espacial del Sentinel

Es la precisión que puede alcanzar el sensor por pixel, es decir, el área real de tierra representada en un nivel digital de información (pixel). Sentinel 2, las bandas: (ver tabla 5) consigue resoluciones de 10m /pixel. Esto quiere decir que un pixel representa $10 \times 10 = 100$ m² de terreno. ((Agromático, 2018), párr. 20.

Para el estudio de la vegetación se pueden utilizar bandas como la 12(11), 8A y 4 en la que se implementa el uso de las infrarroja de onda corta (SWIR). Estas tienen la posibilidad de generar resultados a nivel de suelo y planta, en este caso se puede obtener información de la humedad del suelo y/o las hojas. Estas bandas facilitan información que se desee estudiar para determinar salud, estrés, cambios a nivel de suelos. (Educación Forestal en Almazcara, 2017).

2.10.3 Landsat 8

El satélite Landsat 8, se encuentra operando con 2 sensores llamados; infrarrojo térmico (TIRS). Las mismas en resolución rondan un entre 15 y 30 cm (ver tabla 8). Landsat consta de imágenes espectrales desde infrarrojos hasta espectro radiación de bajas ondas que son dominados por (OLI). Los Infrarrojos térmicos el cual proporciona un dato útil para la tierra y de información que se puede brindar desde el espacio para ver el comportamiento de la tierra. (Geocento-Earth Imagin, 2015)

Tabla 8. Características del Satélite Landsat-8

Parámetros	LANDSAT-8		
Altitud de Órbita	705km		
Bandas Espectrales	Bandas	Longitud de Onda (nm)	GSD (m)
	1 – Coastal Aerosol	300	30
	2 – Azul	450 – 510	30
	3 – Verde	530 – 590	30
	4 – Rojo	640 – 670	30
	5- Infrarrojos	850 – 880	30
	6 - SWIR 1	1570 – 1650	30
	7 - SWIR 2	2110 – 2290	30
	8- Pancromática	500 – 680	15
	9- CIRRUS	1360 – 1380	30
	10- Infrarrojo Térmico 1	10600 – 11190	100 (*30)
	11- Infrarrojos Térmicos 2	11500 – 12510	100 (*30)
	* Las bandas TIRS se obtienen a resoluciones de 60m pero son remuestreados a 30m para información del producto final		
Ancho Pasada	185km		
Distancia de Muestreo (GSD)	15-30km		
Lanzamiento/Expectativa de vida	2013-2018 (tiene suministros hasta 2023)		
Tiempo Revisita	16 días		

Fuente: Caracterización de las bandas multiespectral Landsat 8. En Geocento-Earth Imagin, (2015), Satélite de imágenes LANDSAT-8 Copyright Geocento 2012-2015.

2.10.4 Satélite Spot 4 y 5

La información que provee el satélite Spot, se obtiene mediante una línea de imágenes que nos permitan determinar situaciones que se estén influenciando la tierra y su entorno. Mediante estas fuentes de información se les puede dar seguimiento a la tierra y determinar

las influencias que lo están modificando constantemente, esto mediante control de seguimiento con estas herramientas. (Infoterra Servicios de Geoinformación S.A, 2009)

Tabla 9. Características del Satélite Spot 4 y 5

Productos	Pancromáticos : 2,5 m - 5 m - 10 m
	Multiespectral : 2,5 m - 5 m - 10 m - 20 m
Bandas espectrales	P (pancromáticas); B1 (verde); B2 (rojo); B3 (infrarrojo cercano); B4 (SWIR : infrarrojo de onda corta, para SPOT 4 y 5)
Campo amplio	60 km x 60 km
Intervalo de revisita	2 a 3 días
	1 día con constelación total de satélites SPOT
Selección según necesidad	Sí, estándar o prioritaria
Archivo mundial	> 20 millones de imágenes desde 1986
Ángulo de visión	Deriva : +/- 27°
	Estereovisión hacia delante / hacia atrás con SPOT 5
Exactitud de ubicación	< 30 m (1 σ) con SPOT 5
	< 350 m (1 σ) con Spot 1 a 4
	Orto productos : < 10 m (1 σ) con base de datos de referencia en 3D En otras circunstancias, depende de la calidad de los puntos de control terrestre y MDE
Niveles de pre procesamiento	1A, 1B, 2A, 2B, Ortho

Fuente: Información de las bandas del satélite Spot 4 y 5 y los colores que se le atribuyen a cada banda. En Spot Infoterra Servicios de Geoinformación S.A, (2009), Airbus Defense and Space Obtenido de <http://www.infoterra.es/datos-satellite-spot>

Usando otras bandas podemos realizar composiciones que potencien elementos que se quiera destacar.

2.11 Índices para estudio vegetativo

2.11.1 Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI)

Para la realización de la investigación, se hará uso de algunas tecnologías que procedan a general datos útiles para el desarrollo del proyecto, en este caso una de las principales NDVI.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, también conocido como NDVI por sus siglas en inglés. Este índice se constituye de varias bandas espectrales de medición de la intensidad de la radiación que emiten las plantas, denota que mediante este proceso se puede determinar las variables de cantidad de plantas, desarrollo y la calidad o distribución de la vegetación. (Ramos, 2017) Párr. 1.

Ramos, (2017) párr 4. “Afirma que para el cálculo de los índices de vegetación es necesaria la información, que se encuentre en banda roja e infrarroja de ese espectro electromagnético”.

Para poder obtener información para realizar el cálculo de NDVI, se deben usar las bases principales que conforman la fórmula, están bandas son infrarrojo para la parte de vegetación, fuertes acaparamientos de humedad, salud vegetativa, temperaturas, diferenciar bloques de hielo y más (Araya, 2009)

El cálculo del **NDVI** se hace mediante la siguiente fórmula 2:

$$NDVI = \frac{(NIR - VIS)}{(NIR + VIS)} \quad \dots (8)$$

NDVI: Índice de Vegetación de Diferenciación Normalizada.

NIR: Banda infrarroja cercana.

VIS: Banda roja.

Combinaciones de bandas:

$$NDVI = \frac{(8-4)}{(8+4)} \quad \dots (8)$$

Tabla 10. Clasificación de valor para NDVI

Clasificación	Valor
Nubes y agua (NA)	< 0.01
Suelos sin vegetación	0.01-0.1
Vegetación ligera (VL)	0.1-0.2
Vegetación mediana (VM)	0.2-0.4
Vegetación alta (VA)	> 0.4

Fuente: Parámetros de los valores de índices de vegetación. En López, Martínez, & Fernández, (2014), Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfo métrico e índice de vegetación pág. 3. Tecnología y ciencias del agua-versión On-line ISSN 2007-2422, vol.6 (No.1). Do: Jiutepec ene. /feb. 2015

Es decir, mediante la diferencia entre la reflectancia de las bandas 4 (infrarrojo cercano) y 3 (visible – rojo) dividido por la suma de estas dos bandas de reflectancia.

NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada).

Los niveles de vegetación presentados por la determinación de los índices, muestra información de distribución de la vegetación y poder determinar a través de la onda roja. (Sentinel Hub by Sinergise, 2018) Párr. 3.

Descripción de los valores: El rango de valores de un NDVI es de -1 a 1. Los valores negativos de NDVI (valores que se aproximan a -1) corresponden al agua. Los cercanos a cero (-0.1 a 0.1) representan áreas estériles de roca, arena o nieve. Los valores bajos y positivos representan arbustos y pastizales (aproximadamente 0,2 a 0,4), mientras que los datos que se manejan más altos indican bosques tropicales templados y tropicales (valores cercanos a 1). (Sentinel Hub by Sinergise, 2018), párr.2.

El NDVI se ha implementado en varios usos, uno de ellos es para la determinación y predicción de la sequía, densidades poblacionales de vegetación y además para el monitoreo de zonas de fuego peligrosas. Es un índice que representa mediante creaciones de mapas, la muestra de biomasa de acuerdo a la absorción de clorofila. Este índice se calcula con las bandas (8 y 4), infrarroja cercana y roja donde con la roja absorbe la clorofila y con la de infrarroja cercana la reflectancia. (Educación Forestal en Almazcara, 2017)

En caña de azúcar, menciona que tiene los mismos comportamientos durante su ciclo vegetativo, lo que lo hace variar son sus condiciones climáticas. En caso de que los factores climáticos cambien drásticamente, puede influenciar sobre el cultivo de manera visible. (Pontes, 2005)

Los índices de vegetación son básicos en percepción remota, por la relación entre la alta reflectancia de la banda del infrarrojo cercano, entre 700 y 1,300 nm; y la alta absorción del visible, entre 400 y 700 nm (con un aumento en la reflectancia en el verde, alrededor de 550 nm) sobre todo en el rojo debido, fundamentalmente, a la clorofila de las hojas que absorben las longitudes de onda del rojo y azul Visible. (Chuvieco, 1995, pág. 48)

2.11.2 Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI).

Índice de Agua de Diferencia Normalizada, NDWI por su sigla en inglés. Provee información del estrés hídrico de la vegetación. En las cuales proyecta reflectancia a 0.86 μm y 1.24 μm . Este elimina las variaciones de materia seca que se ven proyectados en el tejido vegetal, haciendo aproximación para la determinación del contenido de agua dentro.

En índices vegetativos -1 a +1, estando los valores menores a 0 asociados a superficies brillantes, sin presencia de vegetación o agua y los mayores a 0 asociados a presencia de agua

y vegetación. Cuanto más se acerca a 1, mayor es el contenido de agua. (SNIA, 2015, pág. 1).

Su fórmula es la siguiente:

$$NDWI = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)} \quad \dots (9)$$

NDWI: Índice de Agua de Diferenciación Normalizado

NIR: Banda infrarroja cercano

SWIR: Banda infrarroja de onda corta (11)

Lo que para el satélite Sentinel tiene como uso en esta fórmula las siguientes bandas:

$$NDWI = \frac{(8 - 11)}{(8 + 11)} \quad \dots (9)$$

En este caso, la relación de bandas multiespectral a analizar estará basadas en la banda NIR- Near Infra Red (o infrarrojo cercano) y la banda SWIR- Short Wavelength Infra Red (infrarrojo corto).

$$NDWI = \frac{(NIR - VERDE)}{(NIR + VERDE)} \quad \dots (10)$$

NDWI: Índice de Agua de Diferenciación Normalizado

NIR: Banda infrarroja cercano

Verde: Banda verde (11)

Lo que para el satélite Sentinel tiene como uso en esta fórmula las siguientes bandas:

$$NDWI = \frac{(8-3)}{(8+3)} \dots (10)$$

Descripción de los valores: Los cuerpos de agua poseen valores de 0.5 y la vegetación tiene valores más pequeños en los que permite la distinción de cuerpos de agua y vegetación con valores positivos entre 0 y 0.2. (Sentinel Hub by Sinergise, 2018)

Se dejan en opción para determinar cambios en los cultivos de ser necesario, lo que indica que en la opción 1 es utilizada para monitorear cambios en el contenido de agua en las hojas de las plantas. (Bo-Cai-Gao, 1996)

Tabla 11. Rangos de valor de estrés hídrico para NDWI

Nivel de estrés	Valor del Índice
Nieve/Nubes/Agua	0
Estrés máximo	0-0.1
Extremadamente alto	0.1-0.2
Muy alto	0.2-0.3
Alto	0.3-0.4
Moderado	0.4-0.5
Moderado bajo	0.5-0.6
Bajo	0.6-8
Muy bajo	>0.8

Fuente: Parámetros para determinar el nivel de estrés hídrico en un índice de agua. En Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible, (2012) Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible, obtenido de www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam/menuite

2.11.3 Índice de Vegetación de Diferencia Verde Normalizado (GNDVI)

Éste es una variante del NDVI que utiliza la banda del verde en lugar de la del rojo, Su fórmula es la siguiente:

$$GNDVI = \frac{(NIR-VERDE)}{(NIR+VERDE)} \quad \dots (11)$$

GNDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Verde Normalizado

NIR: Banda Infrarrojo cercano

Verde: Banda verde (3)

Como su nombre indica, es el cociente entre la reflectividad en el infrarrojo cercano y la reflectividad en la banda del verde, estando este basado en la diferencia espectral en la vegetación en las longitudes de onda del verde y del infrarrojo cercano. (Pearson y Miller, 1972, pág. 1355),

2.11.4 El Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)

Es propuesta por (Huete, 1988) En relación al suelo el SAVI busca realzar una minimización de los efectos del suelo sobre una información o señal que emite al agregarse un factor como “L” que se ajuste al denominador de la fórmula de NDVI. L es la variabilidad que refleja un suelo.

El factor L elegido depende de la densidad de la vegetación que uno desea analizar. Para un nivel de densidad muy pobre, sugieren usar un factor L de 1,0; para un nivel intermedio, 0,5 y para uno alto, 0,25. Para L = 0, SAVI es igual a NDVI. Para L = 100, SAVI se aproxima a PVI. (Abaurrea, 2013, pág. 19)

Para determina SAVI se utiliza la Formula 6:

$$SAVI = 1.5 \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED+0.5)} \quad \dots (12)$$

SAVI: El Índice de Vegetación Ajustado al Suelo.

NIR: Banda infrarroja.

RED: Banda roja.

2.12 Sistemas de Información Geográfica

Unas de los primordiales que vienen a ayudar al procesamiento de la información y además la relación del suelo y la teledetección son los Sistemas de Información Geográfica.

Los puntos importantes que permiten que este sistema de un funcionamiento va de la mano con el software y hardware, además de los datos geográficos en la que se diseña con el fin de proveer información de almacenamiento, análisis, captura y manipulación. (Laboratorio Unidad Pacífico Sur CIESAS, 2010)

Estos sistemas mediante la tecnología y sus usos, permiten el procesamiento de información de la teledetección, a pesar de que además existen otros programas especializados para el análisis de la información.

El SIG, funciona como almacenamiento de datos que poseen información geográfica. Lo que muestra este sistema es una asociación de identificador de objetos (como los mapas) que se emplean digitalizados. Con esta reunión de datos se puede realizar una localización cartográfica, principalmente espacial. (Laboratorio Unidad Pacífico Sur CIESAS, 2010)

2.13 Procesamiento de imágenes satelitales

2.13.1 Imágenes Satelitales

La misión Sentinel-2 consta de dos satélites desarrollados para apoyar la vegetación, la cobertura del suelo y el monitoreo ambiental.

La asociación entre la ESA y el USGS permite la distribución de datos de reflectancia de nivel de atmósfera superior (TOA) de nivel 1C. El procesamiento de nivel 1C incluye correcciones radiométricas y geométricas junto con orto rectificación para generar productos geo localizados de alta precisión. (USGS science for a changin world., 2015)

Estas imágenes son usadas para el monitoreo de cultivo y ver la variabilidad de desarrollo que pueda tener. La misión de Sentinel, provee la información gratuitamente y permite obtención de imágenes satelitales por días y meses específicos, además una resolución muy clara.

2.13.2 Correlación espacial

El procesamiento de imágenes y obtención de ellas, es parte de la importancia de la relación que se pueda generar con la información que se genera, en el caso dado, se busca una relación desde el otro lado de la atmósfera con imágenes satelitales con la humedad del suelo. “Spatial Analytical Perspective on Geographical Information Systems 1987”, Indica que la (AE) auto correlación espacial, refleja el grado en que los datos o mapas pueden ser similares.

Un sensor remoto es el encargado de captar la energía que proviene del proceso de interacciones entre estos dos sistemas. Indica que este medio se ve influenciado por resoluciones espaciales, espectrales, temporales y radiométricas y por otra serie de elementos en la que cuando la interacción es llevada a cabo, este tiene una interferencia que puede causar anomalías con respecto a lo real que se tomó, sin embargo, esto puede variar dependiendo de que tanto estas anomalías sean más fuertes o afectada por el medio topado en la atmósfera. Lo que ocasiona un cambio en la recepción del dato. Lo que busca es poder determinar el problema y corregirlo de manera que el producto de esas correcciones sea en máximo lo posible más eficientes. (Subirà, 2013, pág. 26)

Las capturas de las imágenes de la tierra provienen de la obtención que realizan los satélites mediante la radiación electromagnética generada por el sol cuando es reflejada en un objeto sobre la superficie y además también expulsada de manera de revote pasando por

la atmosfera. Esta información se puede manejar mediante una transformación en las ecuaciones lineales para un mejor uso de la información y manejo de la misma. (Kruse, FA, 2004)

2.13.3 Lectura de archivos

Debido a que están imágenes son de contenido alto y pesado, es importante considerar la capacidad del equipo, se recomienda el uso de carpetas de las imágenes descomprimidas para el uso de correcciones dentro del equipo o sistema.

2.13.4 Descarga de imágenes Sentinel 2 A y B

Para la descarga de las imágenes se pueden encontrar en las páginas correspondientes y para ver más información de las imágenes Sentinel L1C se puede observar cómo se componen y las características que poseen. (Ver en punto 2.9 Teledetección)

Se busca la imagen en el directorio, se abre la carpeta de la imagen Nivel L1C y se hace clic en el archivo de metadatos MDT_MSIL1C.xml En la ventana izquierda, en el Panel Product Explorer aparecerá la imagen. Allí se puede desplegar la información: metadatos, vectores, bandas y máscaras.

Seleccionar en la pestaña Profile la combinación que viene por default o se eligen las bandas de cada canal manualmente. c. Aparecerá la imagen de tres bandas combinadas en el panel derecho El archivo de salida estará ubicado en el directorio donde se encuentra el producto nivel L1C. Ambos tendrán el mismo formato de nombre, y se diferenciarán por la nomenclatura del nivel del producto (ahora es L2A). (Casella, Barrionuevo, Pezzola, & Winschel, 2018)

Para el proceso de introducción de las imágenes en el software:

En complementos es necesario la descarga del Sentinel Hub directamente desde QGis, es importante la habilitación de las imágenes para poderlas procesar. Ingresando las imágenes a la llamada en el plugin SPC, ubicada en la parte superior derecha del programa, en la barra de datos, esta que es una opción del QGis para procesar las imágenes. Se deben de incluir datos como login data para contraseña y usuario del que se deseen descargar la imagen posterior la elección del satélite que se utilizará. (gisandbeers, 2019) párr.6.

2.13.5 Capas raster

Las capas tipo raster estar conformadas por redes en celdas y cuadrículas comúnmente cocidas como pixeles, las cuales permiten ver una cualidad o propiedad espacial a esto se le puede atribuir características como color o altitud. Este modelo es muy básico, sin embargo, es poco compacto, lo que dificulta el procesamiento de datos o muestras de archivos ya que son pesados. Este tiene una ventaja que representa mayormente la realidad. (Matallanes, 2020) párr.13

2.13.6 Capas vectoriales

Las capas vectoriales o elementos geográficos están compuestos por tres estructuras que son características básicas del mismo: puntos, líneas y polígonos. Un modelo vectorial permite que los datos sean compactados a gran capacidad y cuando se desean calcular superficies y distancias son más precisos (Matallanes, 2020)párr.1

Por esta razón se realiza la transformación de una capa raster a vectorial para la elaboración de las capas raster, poder exponer lo pixeles por los que está compuesto la imagen multiespectral y de ahí poder implementar el uso de buffers para poder tomar los datos de la tabla de atributos.

2.13.7 Diseño de una capa raster a capa vectorial

Se debe de tener claro las capas de los archivos raster y que se desea convertir a vectorial. (Documentación QGis 2.18, 2020) Realizando el corte mediante una capa máscara en la herramienta de procesos en la opción “r.to. vect”, con el propósito de crear una capa de puntos que permita captar a mayor parte de píxeles alrededor de un buffer, estos se pueden observar en la tabla de atributos.

Estos apartados se realizan para poder realizar correlaciones con datos de humedades de suelo.

2.13.8 Combinación de dos capas en la imagen Sentinel 2 para obtener índices.

Se realizan por medio de la calculadora raster, donde permite la combinación mediante las fórmulas mencionadas en los apartados anteriores de Índices de agua o vegetación. (Ver fórmulas 8 y 9). Pág. 41-44. Esta calculadora raster se utiliza comúnmente como una calculadora normal. Esta debe poseer dentro, mediante la opción agregar las bandas de la imagen en la calculadora para poder realizar la combinación.

Es una herramienta que permite realizar operaciones matemáticas sobre los valores de los píxeles existentes en un raster, lo que es útil para la conversión y manipulación de dichos datos. (Ramos, D 2017)

2.13.9 Diseño de tonalidades de las capas.

Se realiza un clic en paneles, estilo de capas que abrirá “simbología”, el cual actualiza automáticamente de acuerdo al estilo que se le dé, en esta línea se tienen opciones como: bordes, colores de relleno, colores de anchura, anchura de marca, estilo, ángulos, desplazamiento entre otros y se decide que tonificación se adapta mejor a las necesidades. Además, en propiedades de la capa se selecciona “categorizaciones” para dar tonalidades y

se “clasifica”. En esta opción el mapa cambia su tonalidad. El siguiente paso es copiar y pegar este estilo en todas las categorías que se tienen (Serrano, 2020). Párr. 4 y 13.

2.14 Diseño de un mapa

El diseño de un mapa consiste en insertar elementos sobre la composición y administrar sus propiedades, tales como la vista del mapa, barra de escala, tablas, entre otros.

Para añadir la Vista del Mapa, en menú Añadir Elemento > Añadir Mapa, o en el botón con el mismo ícono en la barra de herramientas. De ahí se parte de acuerdo al diseño que se desea, con opciones de mover, centrar, colocar grillas, añadir fecha del norte, permite editar el nombre de la capa o categoría, agregar barras de escala. Se puede incluso guardar el tipo de diseño de mapa, para próximas creaciones. (Pérez, 2018)

Se pueden configurar la escala. También puede configurar el sistema de coordenadas en *SRC*, al que desee ejemplo: UTM/WGS84 Zona 17 Norte. Ya concluida las configuraciones del mapa y su diseño, se exporta el mapa en tipo de documento pdf o como imagen. (Pérez, 2018)

Capítulo III. Marco Metodológico

3.1 El paradigma

El paradigma de la investigación es positivista ya que está enfocado en un proyecto cuantitativo. Donde se busca aprobar o rechazar una hipótesis.

3.2 El enfoque

El enfoque es cuantitativo, debido a que la información que se recolectó y el enfoque investigativo, muestra características cuantitativas que se desean mezclar para obtener una respuesta a la reflectancia que ejercen las plantas hacia el sensor y este se puede plasmar en mapas para hacerlo visible al ojo humano como cualidad, ya que nos permite ver mediante mapas las características mediante imagen multiespectral como se encuentran los lotes de vegetación y agua. También se midieron variables cuantitativas como densidad aparente, densidad real, lámina de agua, índices de agua y vegetación en las que se obtienen dan numéricos para correlación de ambos extremos.

3.3 Tipo de investigación

El tipo de investigación es exploratoria debido a que se busca investigar un problema planteado en el estudio a realizar, pero también innovadora, ya que el tema es reciente en estudio, se hizo uso de la tecnología que ha venido a propiciar información importante en la agricultura.

3.4 Hipótesis

3.4.1 Hipótesis Nula

Los datos del Índice de Vegetación de Diferenciación Normalizada (NDVI) y el Índice de Agua de Diferenciación Normalizada y lámina de agua en suelo presenten relación entre sí para determinar el estrés hídrico.

3.4.2 Hipótesis Alternativa

Los datos del Índice de Vegetación de Diferenciación Normalizada (NDVI) y el Índice de Agua de Diferenciación Normalizada y la lámina de agua en suelo no presentan relación o el dato no sea confiable para determinar el estrés hídrico.

Tabla 12. Variables de análisis de la investigación.

Variable	Tipo	Definición		
		Conceptual	Operacional	Instrumental
Humedad de suelo.	Continua.	Es la cantidad de agua que tienen los poros del suelo.	Se introduce un sensor de humedad a los 20 y 40 centímetros de profundidad en los puntos de muestreo.	Marca de sensor MP KIT- Sensor volumétrico de barreno.
Lámina de agua.	Continua.	Es la cantidad de agua que es aplicada y se mantiene en el suelo.	Aplicada por gravedad. Mediante tomas de humedad del suelo con un sensor de humedad.	Con un sensor de humedad se mide el volumen de agua en el suelo, mediante una fórmula se pasa de humedad volumétrica a lámina de agua.
Densidad aparente.	Continua.	Relación entre volumen y peso seco del suelo.	Toma de muestras de suelo, se ponen a secar, su peso seco y húmedo se realiza una fórmula para obtener Da.	Cilindros metálicos Formula: $Da = \frac{P_{ss}}{Vol\ cilindro}$... (6)
Densidad real.	Continua.	Peso de la partícula del suelo.	Toma de muestras de suelo, molerlo y colocarlo en agua.	Cilindro metálico, romana electrónica, agua. Formula: $Dr = \frac{P_{ss}}{V\ sólidos}$... (7)
Índice de vegetación (NDVI).	Continua.	Cantidad de humedad reflejada por una planta mediante la radiación que se da a través del sol.	Captada por equipos multispectral (receptores de radiación) como el satélite Sentinel 2.	Imágenes multispectral del Satélite Sentinel Formula: $NDVI = \frac{(NIR - VIS)}{(NIR + VIS)}$... (8)
Índice de humedad (NDWI).	Continua.	Cantidad de humedad reflejada por una planta mediante la radiación que se da a través del sol.	Captada por los sensores de las cámaras multispectral del Sentinel 2.	Imágenes multispectral del Satélite Sentinel 2 $NDWI = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)}$... (9)

3.5 Población

La variedad BC001220 (ver anexo 20), fue desarrollada en Ingenio Taboga y seleccionada para cubrir las necesidades de acuerdo a tipos de suelo y adaptada a las características peculiares de la zona. De esta variedad se conoce poco de sus características, puesto que apenas se está trabajando y cultivando para valorar los resultados en rendimiento y adaptabilidad.

3.6 Las técnicas de muestreo y establecimiento de las muestras

3.6.1 Selección de lote a evaluar

Para la selección de los lotes a muestrear se eligieron aquellos que:

- a) Tengan la variedad BC 001220.
- b) Cuenten con riego por gravedad.
- c) Estén cosechados en diciembre para muestrear de los meses de verano (enero, febrero, marzo y abril).

3.6.2 Modelo matemático

Tabla 13. Variables y fórmulas de los modelos matemáticos utilizados en la investigación.

Variable	Fórmulas
Humedad de suelo.	Obtenido mediante el sensor de humedad en %Humedad volumétrica
Lámina de agua.	$La = \frac{(CC-PMP)}{100} * Da * prof \dots (4)$
Densidad aparente.	$Da = \frac{Pss}{Vol\ cilindro} \dots (6)$
Densidad real.	$Dr = \frac{Pss}{V\ sólidos} \dots (7)$
Índice de vegetación (NDVI).	$NDVI = \frac{(NIR-VIS)}{(NIR+VIS)} \dots (8)$
Índice de humedad (NDWI).	$NDWI = \frac{(NIR-SWIR)}{(NIR+SWIR)} \dots (9)$
Volumen de cilindro.	$V = h * \pi * r^2 \dots (15)$
Pearson para "r" en Excel.	$y = \frac{\sum(x-x)(y-y)}{\sum \sqrt{\sum(x-x)^2 \sum(y-y)^2}} \dots (16)$

3.6.3 Selección de los puntos de muestreo

Para la selección de las muestras de suelo se tomaron como base los mapas de las texturas de suelos, de acuerdo con los mapas que se pueden ver en figura: 13 y 14 se colocaron los puntos de muestreo.

Una vez seleccionados los lotes con las características anteriores, el muestreo de campo se realizó por medio de muestreo dirigido se Posterior a eso, se georreferenciaron los puntos y se marcaron con estacas para identificar las muestras. (ver anexo 9).

Materiales utilizados: Mapa general de la finca, información de ubicación de las variedades, sistemas de riego, información previa de textura de suelos.

3.6.4 Ubicación y marcaje de los puntos a muestrear de los lotes

Posterior a la ubicación de los lotes, se colocaron las estacas de madera y se les colocó una cinta color amarilla que permitiera visualización del punto de muestra en el lote, además de poderlo ubicar con el GPS.

Se ubicaron los puntos dirigidos de acuerdo a la textura del suelo, esto se realizó con el programa QGis 2.18.19 donde se colocaban aproximadamente los puntos donde se podía evaluar tomando en cuenta la textura de los suelos y por ende se visitaron los lotes para proceder a la colocación de las estacas donde se iban a seguir tomando las muestras de suelo y de humedad (ver anexo 10).

3.6.5 Establecimiento de puntos georreferenciados

Los puntos marcados se utilizaron después en la metodología de la creación y ubicación de los mapas en el programa QGis 2.18.19, seguida la ubicación con las estacas.

Materiales utilizados: 12 estacas de madera, maso para poner estacas de madera, tiras de color amarillo o naranja para colocarlo en estacas, programa QGis 2.18.

Tabla 14. Características de lotes.

Lote	Suelo	Variedad	Características
Hortigal-L	Arcilloso.	BC001220.	Forma rectangular, lotes cosechados en segundo tercio en época de enero, con tipo de riego por gravedad, Anexo 24.
San Carlos-I	Franco arenoso.	BC001220.	Cerca de un río, lote dividido en tres partes, lotes cosechados en primer tercio, quiere decir que, en época de diciembre, tipo de riego por gravedad. Anexo 23.

3.6.6 Ubicación de desarrollo práctico

Para el análisis del cultivo de Caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) se desarrolló en lotes de Ingenio Taboga S.A., ubicado en Bebedero de Cañas, Guanacaste con Latitud: 10.3695, Longitud: -85.1948 en un área de 31.28 hectáreas cultivadas con edad del cultivo de 0 a 160 días de desarrollo o menos.

3.7 Trabajo en campo

3.7.1 Toma de las muestras de suelo

Mediante un aleatorio simple se seleccionaron los puntos de muestreo de suelos de acuerdo a los mapas de textura de suelo se evaluaron 22 puntos. Las muestras de suelos se tomaron a 20 cm y 40 cm de profundidad con el uso de cilindros de 153.03 m³ de volumen.

Materiales utilizados: Cilindro metálicos de 2 ½ a 3 pulgadas, horno para secado de muestras, papel aluminio, pilot permanente, Cinta adhesiva, Bolsas plásticas, Romanas, Bandejas metálicas para hornear, Palin, Cuchilla, Mazo, Libreta, Lapicero, Hielera para mantener la humedad de las muestras.

3.7.2 Toma de datos de humedad en campo

En los mismos puntos de muestreo de suelos se realizaron 4 mediciones de humedad (una vez mensual).

Conjunto a las imágenes se tomaron muestras de datos de humedad con un sensor de humedad en el área a analizar. La toma de muestras de humedad al suelo en puntos establecidos y debidamente geo referenciados.

Los datos se tomaron cada vez que se calculaba la fecha del pase del satélite de cada 5 a 10 días para llevar una secuencia de monitoreo de las imágenes del mismo y en conjunto generar los datos de humedad o balance hídrico. Esta corrección atmosférica fue realizada en la función de la opción de QGis en la opción en barra de herramientas de SCP en la misma ventana de procesamiento de Sentinel 2.

Se realizó la toma de los datos en lotes de caña planta a edad de 30 días después de la cosecha y posteriormente cada 30 días se medía la humedad en campo hasta llegar a una edad de 120 días. Esta misma toma de datos se realizó en los mismos puntos donde se extrajeron las muestras de suelo marcados con el GPS para tener una referencia más exacta de humedad, además se ubicaron puntos en los que los drenajes no interfirieran en la humedad del lote.

Materiales para establecimiento de puntos georreferenciados: 12 estacas de madera marcadas, mazo para poner estacas de madera.

Materiales para toma de muestras humedad: Sensor de humedad, barreno, libreta, lapicero.

Como mínimo se analizaron datos de 4 mediciones en un tiempo de 4 meses.

3.8 Manejo en Laboratorio

3.8.1 Análisis de densidad aparente

Después de haber tomado las muestras de suelo, se transportaron cubiertas y en una hielera para que mantuvieran la humedad, ya en el laboratorio se pesaron las muestras una a una en una romana electrónica (ver anexo 12), con todo y cilindro, ese peso del cilindro fue retirado para obtener el peso real del suelo húmedo. Al estar listas las pruebas se pusieron en unos

moldes de aluminio cada una por separado, para introducirlas al horno 48 horas para ponerlas a secar, al pasar las 48 horas de estar secando, se extrajeron para ser pesadas una a una en peso seco y poder determinar mediante fórmulas la densidad aparente y real (ver anexo16).

3.8.2 Análisis de densidad real

Para la obtención de la densidad real se tomaron las muestras secas por separado y se molieron en un molde de cerámica con un bolillo hasta quedar muy fino, se usó un recipiente de vidrio con agua (agua y peso del recipiente medido), del suelo por muestra se usaron 5 gramos y se le agregaron al agua y luego se pesó para ver la distribución del volumen de suelo en el agua.

Cada uno de esos datos se agregó a un documento Excel donde se calcularon con fórmulas para obtener la densidad aparente, real y volumen del cilindro. (ver fórmulas 6 y 7 o en tabla 13 de modelo matemático)

3.9 Obtención de Imágenes Satelitales

Se desarrolló un análisis espacial con datos del sensor multiespectral del Satélite Sentinel 2, el cual presentaba 2 satélites que pasaban interceptando la tierra con la toma de imágenes y en las que por la ubicación se escogían las imágenes con buena visibilidad y de las fechas de muestreo. Este satélite, presenta 13 bandas espectrales ver (tabla 3) que permite obtener datos para cálculos de las bandas de acuerdo a la necesidad que se desee obtener, en este caso NDVI (Índice de Vegetación de Diferenciación Normalizada) para esta misma se utiliza la Banda de infrarrojos cercano 8 (NIR) y la banda roja 4 (VIS) para determinar la salud de las vegetaciones, con una resolución espacial de 10 metros.

3.9.1 Características deseadas de las imágenes

La importancia de la obtención de las imágenes, era coincidir con las muestras de humedad por lo que el monitoreo se daba muy continuo. Por otra parte, la imagen ideal para

una mejor resolución eran las imágenes que se encontraban libres de nubosidades, mayor visibilidad y sin interferencia al punto exacto de ubicación de los lotes. Por esta razón es que las imágenes satelitales, se obtienen de mejor calidad en época de verano debido a que el cielo se encuentra despejado.

Materiales para uso de imágenes: Computadora, programa QGis 2.18.19, imágenes satelitales Sentinel 2 A y B, Internet

3.9.2 Corrección de imágenes satelitales

Las imágenes satelitales del sensor de Sentinel, se descargaron en formato JP2, como primera parte. Consistieron en convertir ese formato o extraer a una carpeta externa que facilite el procesamiento y sea aceptado por los programas.

Para poder procesar las imágenes, en el programa de QGis 2.18.19, se cargaron las 13 bandas las cuales son conformación de las imágenes satelitales, que van a dar vida al conjunto de datos de los índices una vez procesadas. Estas en el sistema se da la opción de herramientas llamada SPC, ubicada en la parte superior derecha del programa, en la barra de datos, esta que es una opción del QGis para procesar las imágenes. De ahí se accede a la dirección de donde se ubica la carpeta y se buscan las carpetas a trabajar, se les da seleccionar para adjuntar las imágenes en formato JP2 y además seleccionar el documento MTD (XML) como segunda dirección. Al cargar los datos, se agrega la carpeta a la que se desea guardar y se le da clic en la opción guardar en la carpeta de destino. Este procedimiento corresponde a la corrección atmosférica antes de ser procesadas debido a que se usaron imágenes corregidas radiométrica y geográficamente. Las imágenes usadas y por facilidad de descarga y a disposición del usuario C1 (ver en anexo 9 y 10).

Se realizó el desarrollo de la fórmula en el software de QGis para ser procesadas, permite la capa raster y además con la calculadora de campo que para realizar la fórmula de las bandas del NDVI y NDWI.

El valor del índice varía de -1 a 1, siendo el valor de la vegetación verde entre 0.2 y 0.8.

Materiales para corrección: Computadora Hp: Procesador AMD AG-5200 APU with Radeon TM HD graphics 2.00GH/ RAM instalada 4.00 GB/Sistema operativo 64 bits/ procesador x64, Programa QGis 2.18.19.

3.10 Los instrumentos y el proceso para validarlos

Mediante la herramienta y un análisis estadístico mediante tablas y gráficos, se determinó si existe una correlación entre el NDVI, NDWI y la humedad de suelo, del cultivo de esta manera se realizaron gráficos donde se colocaron los resultados para poderlos comparar. Las herramientas que se utilizaron para para compararlos fue el Excel mediante tablas y gráficos de correlación de los datos. Además, también se utilizó el método del r^2 y el r . El cual indican que entre los datos que se obtienen en las gráficas, son cercanas o igual a 1, su correlación es muy significativa.

3.11 Proceso de Imágenes para NDVI y NDWI

Después de procesamiento de las imágenes, se procedió a la realización del cálculo de los Índices NDVI y NDWI para lo cual, se utilizó la opción en herramientas “Raster” en la misma se encuentra la “calculadora raster”, donde se introducen los datos de imágenes y además las fórmulas correspondientes para cada índice, se crea una carpeta en la computadora y los archivos se guardan en una carpeta donde está guardado el proyecto para cada imagen.

3.11. 1 Creación de linderos y puntos de muestreo

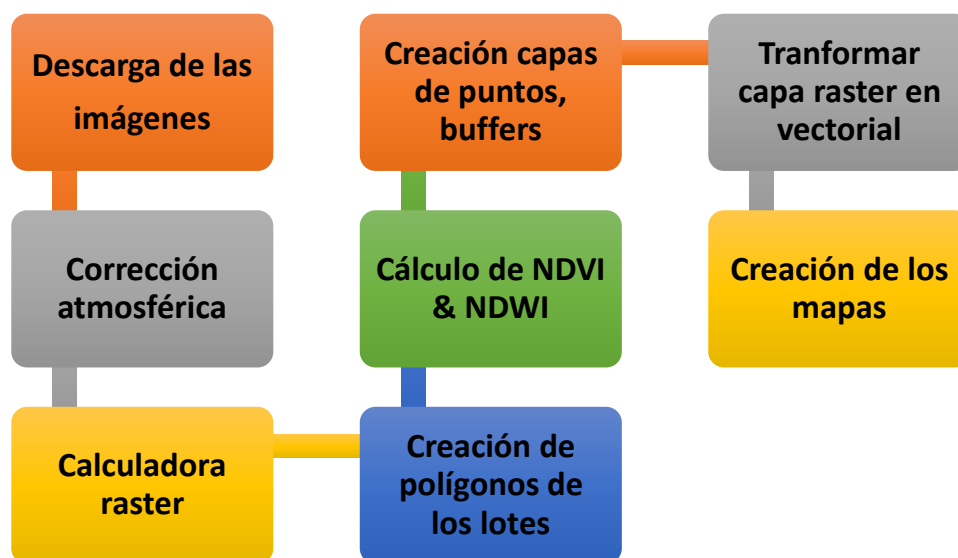


Figura 4. Diagrama de flujo de proceso de imágenes para la creación de mapas.

Se crea una capa tipo polígono para dibujar el perímetro del lote, así poder cortar las capas de cada índice y solamente manejarlas para los mapas y los demás procesamientos del área de lote como tal.

Por otra parte, se introdujeron los puntos de muestreo vía manual con la opción de “añadir capa de texto delimitado” donde se agregaron los puntos que se estuvieron muestreando mensualmente y poderlas ubicar en los lotes. A estos mismos puntos se les creó un buffer.

El buffer consistió en crear, un círculo alrededor de los puntos, estos buffers ubicados en (Caja de herramientas). Estos buffers son de tamaño 25 metros en los que se utilizaron los datos de los índices alrededor para poder hacer el comparativo de los gráficos.

Los datos tomados de las imágenes satelitales, son números de los índices por pixel que se obtiene mediante los buffers para selección de datos.

Se tomaron por punto mediante la tabla de atributos para hacer el comparativo contra las humedades tomadas de campo.

Consiguiente a esto se cortaron las imágenes mediante “capa máscara” para trabajar y generar los mapas solo con el polígono del lote.

Las capas máscaras se les hizo la conversión de capa raster a capa vectorial, esto con el propósito de poder tomar los datos del buffer y verlos en la tabla de atributos. Para esta opción se utilizó en “caja de herramientas de procesos” la opción, “r.to. vect”.

En la producción de las imágenes de NDVI y NDWI se les dio un tono para cada índice, en la cual el de tono azul es para agua y el verde para vegetación.

3.11.2 Intersección vectorial entre los índices y los datos de humedad

Ya convertido el raster en vectorial, se marcan los buffers (cuando se tornan de color amarillo). Una vez que se estableció el marcaje, se abre la tabla de atributos y los datos que están el buffer marcados se van a ver marcados en la tabla, por ende, lo que se procedió fue a copiar los datos uno a uno y pasarlos a unas tablas de Excel, luego procesarlos, mediante promedios para usarlos en las correlaciones.

3.11.3 Producción de mapas

Ya listas las imágenes, en el software de QGis, en la pestaña “archivo” se creó un “diseñador de impresión” en el que se estructuró un diseño de mapa para colocar simbología, y datos del mapa.

En total se crearon 20 mapas en imagen PNG y documento PDF donde se puede observar la distribución de humedad en las plantas y la vegetación.

Además, se crearon los mapas de ubicación de la zona a ser trabajada, y mapas de puntos en los que se estuvo evaluando durante 6 meses, previo se realizaron los mapas de texturas.

3.12 Correlación de datos de índices con humedades de suelo

Una vez con los datos de índices y humedades de suelos transformados en láminas de agua, se procedió a la creación de las correlaciones mediante tablas y gráficos, esto con el fin

de calcular los coeficientes de correlación con Pearson y los coeficientes de determinación con r^2 .

Para transformar la humedad volumétrica que se obtuvo con el sensor, se utiliza la siguiente fórmula.

$$La = \frac{\%HG}{100} * Prof \quad \dots (15)$$

La: Lámina de agua (mm)
 %HG: Humedad gravimétrica
 Prof.: Profundidad de suelo (mm)

El coeficiente de correlación de Pearson es una manera en la que permite cuando se tienen datos diversos, ver la relación que existe entre las variables, de esta manera permite una correlación cuantitativa y lineal. (Riquelme, 2019)

Se cumplen una serie de factores para la utilización de la fórmula de Pearson Según (Microsoft office, 2019) en la que se trabaja a partir de formulación existente en Excel:

- a) Los argumentos deben ser números o nombres, constantes de matriz o referencia que contengan números.
- b) Si el argumento de matriz o referencia contiene texto, valores lógicos o celdas vacías, estos valores se ignoran; sin embargo, se incluyen las celdas con el valor cero.
- c) Si los argumentos matriz1 y matriz2 están vacíos o contienen un número diferente de puntos de datos, PEARSON devuelve el valor de error #N/A.

La fórmula para el coeficiente de correlación producto o momento r de Pearson es la siguiente:

$$r = \frac{\sum (x-x)(y-y)}{\sum \sqrt{\sum (x-x)^2 \sum (y-y)^2}} \quad \dots (16)$$

Ecuación

Donde x e y son las medias de muestra PROMEDIO (matriz1) y PROMEDIO (matriz2).

En este contexto se resumen algunos criterios de interpretación: Para el tema del coeficiente “ r ” se indica según la (Gestión de Operaciones, 2015) que este puede variar de -1 a 1 , en este se indica la magnitud en la que se da el valor, la correlación y el valor numérico para la interpretación de los datos.

Tabla 15. Criterios de interpretación de coeficiente “ r ”

Rango	Correlaciones según el coeficiente “r”
- 1,00	Correlación negativa perfecta
- 0,90	Correlación negativa muy fuerte
- 0,75	Correlación negativa considerable
- 0,50	Correlación negativa media
- 0,10	Correlación negativa débil
0,00	No existe correlación lineal alguna entre las variables
0,10	Correlación positiva débil
0,50	Correlación positiva media
0,75	Correlación positiva considerable
0,90	Correlación positiva muy fuerte
1,00	Correlación positiva perfecta

Fuente: (Gestión de Operaciones, 2015)

Capítulo IV. Presentación y análisis de los resultados

4.1 Ubicación de las zonas de estudio

Para observar la zona en la que se llevó a cabo el estudio, se realizó el diseño del mapa mediante QGis con las capas de zonas de Costa Rica, la selección en la capa, se filtró la zona provincias de Guanacaste, y el cantón Cañas, para la demarcación de la zona estudiada.

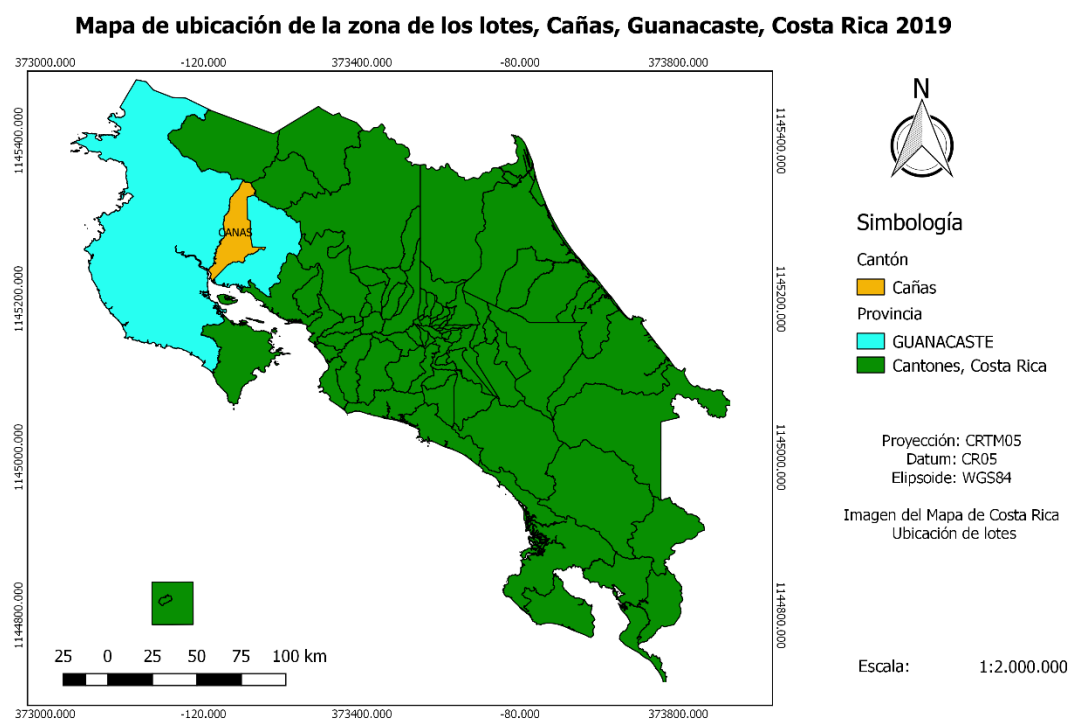


Figura 5. Mapa de ubicación geográfica del área de estudio en cultivo de Caña de Azúcar, (Saccharum officinarum), Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).

La imagen la figura 12, muestra la zona donde se encuentra el cultivo de caña de azúcar y finca donde se realizó el proyecto. Para la realización del proyecto se trabajó en la provincia de Guanacaste en el cantón de Cañas, en una ubicación geográfica 10.4358848, -85.0960567. Esta zona es bastante conocida por las grandes extensiones, en área, del cultivo con condiciones ambientales que favorecen y no al cultivo. Aquí la caña de azúcar está sometida

a temperaturas altas provocando que si no se le da una asistencia correcta al cultivo en cuestión de riego o se le exceda de este por (problemas de inundaciones o encharcamientos fuertes), se va a generar un estrés hídrico, muy de la mano con los tipos de suelos que tengan y la variedad con que se trabaje, ya que no todas se comportan exactamente igual, si no que su proceso y desarrollo se desenvuelven de acuerdo a las variables antes mencionadas.

En el mapa anterior se muestra la ubicación del área de estudio del cual se elaboraron los mapas de índices de vegetación y además el de índices de agua. La provincia Guanacaste se representa de color celeste y en amarillo el cantón de cañas (específicamente Bebedero).

4.2. Proceso de muestras en laboratorio de suelos

Se muestran los resultados en tabla 16 de los análisis de suelos obtenidos de las pruebas de campo y su procesamiento en el laboratorio. (Ver tabla en anexo 3,4,5)

La tabla muestra un resumen, el volumen del cilindro es de $123,15 \text{ m}^3$. Los datos procesados y los tipos de densidad real y aparente que se obtuvieron.

En la siguiente tabla se presentan los promedios realizados a todos los puntos que se tomaron en el proceso.

4.2.1 Resultados de muestras de densidad aparente y real en promedio para la zona de San Carlos (inceptisoles) y Hortigal (Vertisoles).

Tabla 16. Valores de densidad aparente, densidad real y % porosidad para suelos inceptisoles, tomados en la zona de estudio, lotes San Carlos-Taboga

Inceptisoles				
		Da	Dr	
	Profundidad (cm)	(gr/cm³)	(gr/cm³)	% Porosidad
San Carlos I	0-20	0,85	2,33	63
	20-40	0,91	2,34	61

Tabla 17. Valores de densidad aparente, densidad real y % porosidad para suelos inceptisoles, tomados en la zona de estudio lote, Hortigal-Taboga.

Vertisoles				
		Da	Dr	
	Profundidad (cm)	(gr/cm³)	(gr/cm³)	% Porosidad
Hortigal L	0-20	0,99	2,49	60
	20-40	1,03	2,41	57

La densidad aparente medida en los suelos inceptisoles dio como resultado de una densidad aparente del 0.85(gr/cm³) a los primeros 20 centímetros del suelo y a los 40 cm se obtuvo un resultado 0.95(gr/cm³), el cual de acuerdo al indicativo de suelos mediante un estudio realizado por (Alvarado & W, 2005) en Costa Rica lo cual denota suelos muy próximos a suelos francos por sus características y acorde a lo estudiado. (Ver en tabla 3)

En el caso de la zona de suelos con texturas Vertisoles, Hortigal; indica en los primeros 20 cm una densidad aparente de 0.99(gr/cm³) y para los 40 (gr/cm³) una obtención de

1.03(gr/cm³) un poco más alto que el que se presenta en la tabla 4, sin embargo, entre los rangos considerados para los suelos Vertisoles. (Ver tabla 4)

4.3. Diseño de mapas

4.3.1 Mapas de texturas de suelo

Se realizó el diseño de los mapas de distribución de las arenas y arcillas respectivamente para las dos diferentes zonas. Estas áreas presentan para San Carlos un orden Inceptisoles y para Hortigal un orden Vertisol.

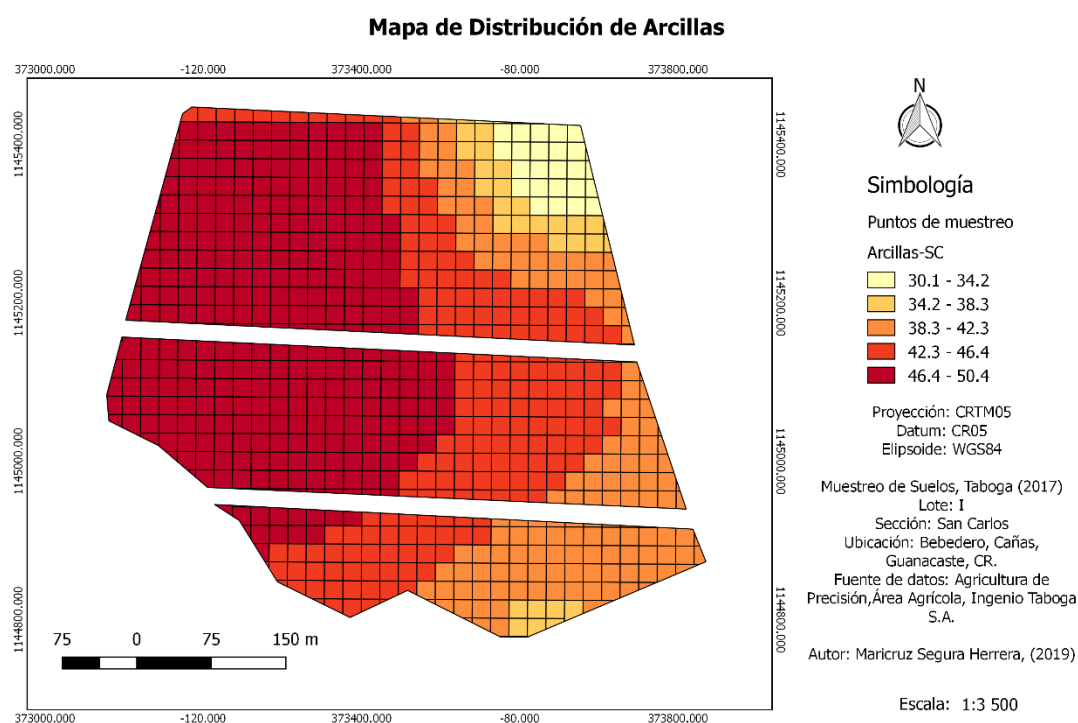


Figura 6. Mapa de arcillas de la sección San Carlos, Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).

La figura 9, representa la distribución de las arcillas en los suelos de lotes San Carlos-I. de acuerdo al muestreo de suelos se realizó la distribución de los puntos, para poder ubicar los muestreos de humedad.

En el lote se concentra una mayor parte de arcillas donde se representa de 46.4 a 50.4 del porcentaje de arcilla.

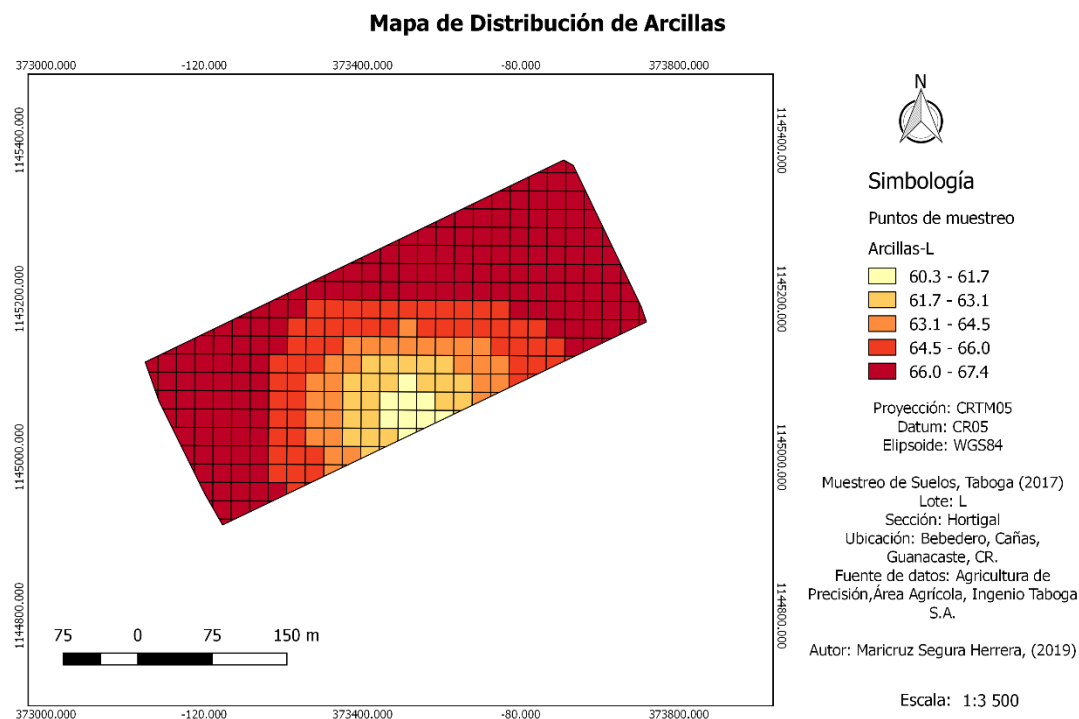


Figura 7. Mapa de arcillas de la sección Hortigal, Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).

En la figura 10, se encuentra la distribución de arcillas, se denota la mayor parte de 60.0 a 67.4. Se identifica la mayor parte del lote arcilloso.

Este sector está rodeado de muchos lotes con cultivo de caña de azúcar y con texturas similares. Presenta drenajes, como cunetas y drenajes principales para su debido drenaje posterior a riegos o épocas lluviosas.

Se observó una textura similar a la plastilina cuando se realizaron los huecos para muestreos, esta textura, se caracteriza por ser pegajosa y también porque toma forma cuando se es tomada y apretada con las manos.

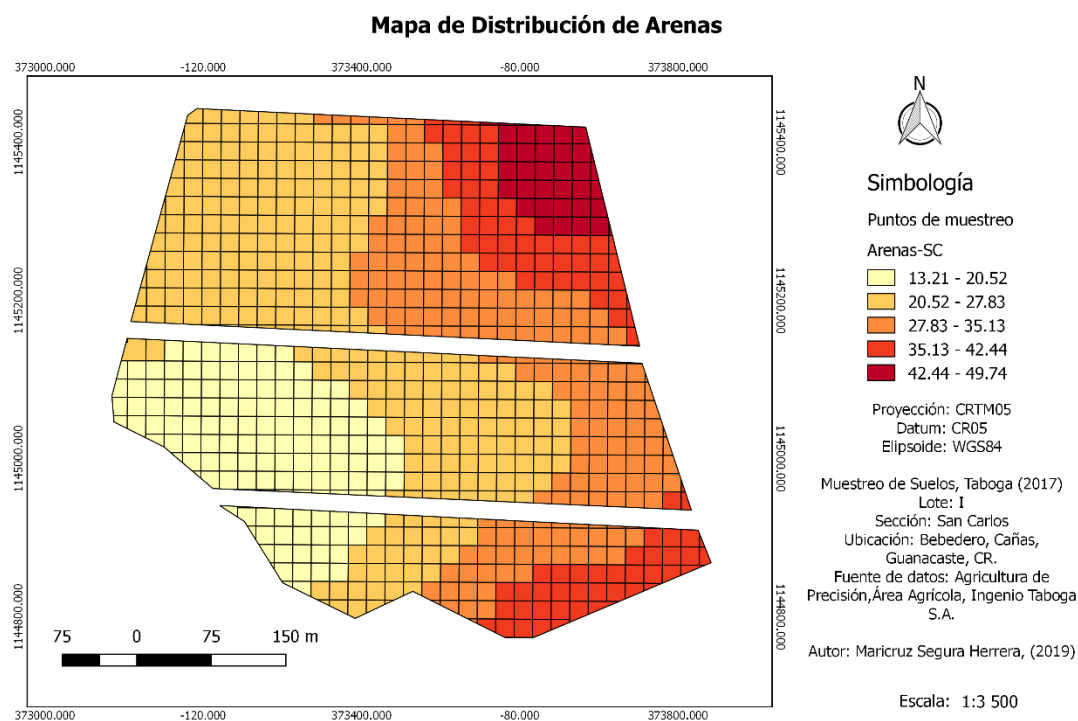


Figura 8. Mapa de arenas de la sección San Carlos, Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).

En la figura 9, se encuentra la distribución de las arenas en el lote, se encuentra un porcentaje de distribución general, sin embargo, de rangos distintos. El punto más arenoso es de 42.44 a 49.74, un punto fuerte 20 al 42.44 en la distribución.

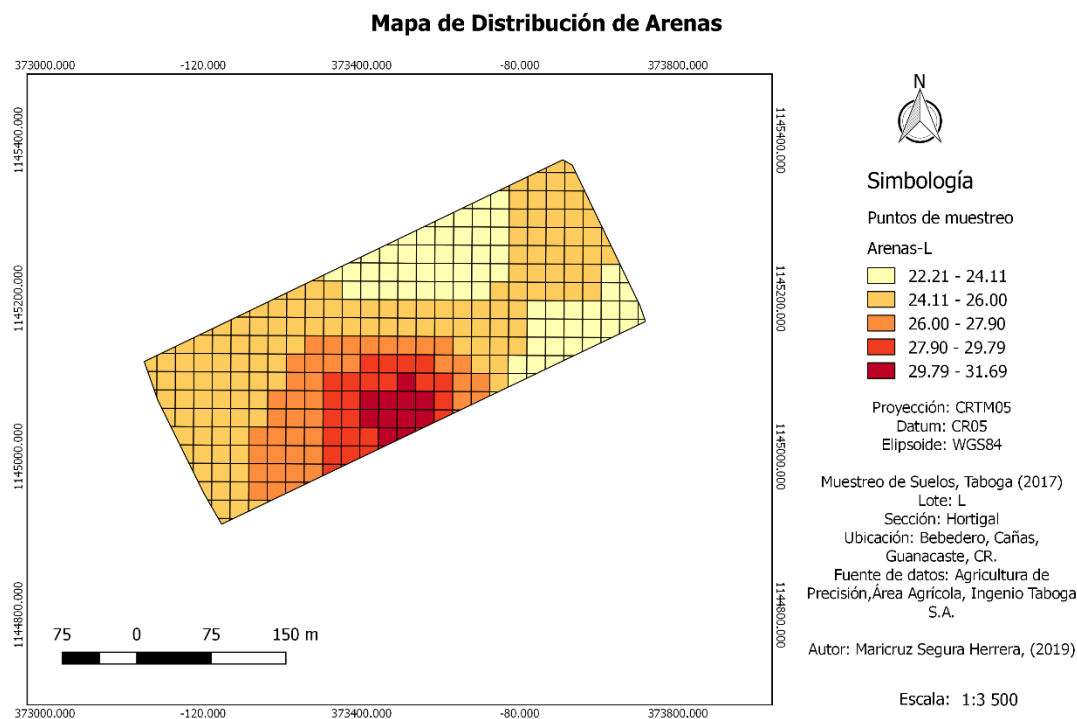


Figura 9. Mapa de arenas de la sección Hortigal, Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).

La figura 11, muestra la representación de las arenas en lote de Hortigal, de 29.79 a 31.69 en su máximo de distribución de arena. Sin embargo, el lote representa poca distribución de arena.

4.3.2 Toma de muestras de humedad en campo de acuerdo al paso del satélite

Las muestras de humedad en campo, se coordinaron justamente con el monitoreo de viaje del Sentinel 2 (A o B) de acuerdo a los cálculos del pase por el sector deseado. Estos satélites estaban calculados de 5 a 15 días aproximadamente según los datos de información del mismo, sin embargo se movió las fechas de su paso para el B cada 3 días y para el A cada 2 días respectivamente, incluso días en los que su paso era de cada 4 o cada 10 días. Por lo que

se le realizó un seguimiento constante con la fecha de las imágenes para poder predecir su próxima toma.

Estas humedades se tomaron en campo mediante el sensor de humedad las que luego se calcularon a lámina de agua para correlacionarlas con los índices de NDVI y NDWI respectivamente.

Información de estudios históricos de suelos en Taboga, indican una tabla que ayuda en la valoración de los parámetros hídricos de los suelos, donde se encuentra el cultivo de caña de azúcar. Estos parámetros son de capacidad de campo y punto de marchitez permanente en porcentaje. (Véase en Tabla 3).

Tabla 18. Parámetros de capacidad de humedad en el suelo de acuerdo a la textura calculados en Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas Guanacaste, Costa Rica.

Parámetros hídricos de los suelos evaluados	Lotes			
	I-5	I-6	I-7	L-2
Capacidad de campo (CC) en %	35.67	38.22	41.04	45.45
Punto de marchitez permanente (PMP) en %	16.98	18.20	19.54	21.64

4.3.3 Mapa de ubicación de puntos de evaluación.

En esta área se replantó toda la toma y recolección de los datos de campo para ser procesados mediante análisis en programas y gráficos correspondientes.

Cada punto posee un buffer (perímetro de 25 metros), de donde se extrajeron los datos de los índices de vegetación e índices de agua para la correlación.

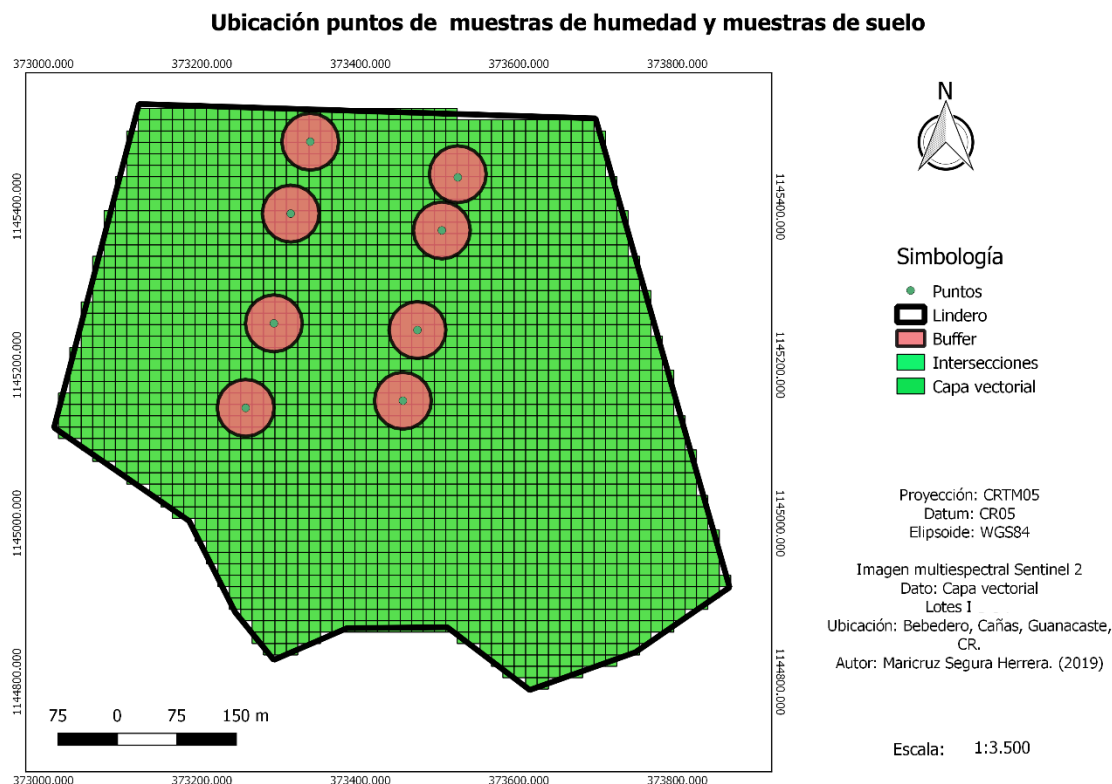


Figura 10. Mapa de capa vectorial de ubicación de puntos en sección San Carlos, Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste, (2019).

Estas capas que se generaron primero, los índices de vegetación o de agua, se agruparon de manera que podamos observar los pixeles más fácilmente mediante la conversión de una imagen raster a vectorial, de esta manera poder marcar solamente los 25 metros a la redonda del buffer (la rueda de tonalidad rosada que se muestra el mapa) y obtener los datos en la tabla de atributos.

El buffer en esta sección, permite tomar datos que están a la redonda en 25 metros. Los datos que se seleccionaron fueron datos de índice de vegetación e índices de agua, esto con el fin de poder tener una panorámica un poco más amplia de los índices alrededor de los muestreos y obtener un promedio. Estos datos se marcaron y se obtuvieron de la tabla de

atributos, donde se extrajo la información y se agregó a una tabla en un documento de Excel para poder correlacionarla con las láminas de agua.

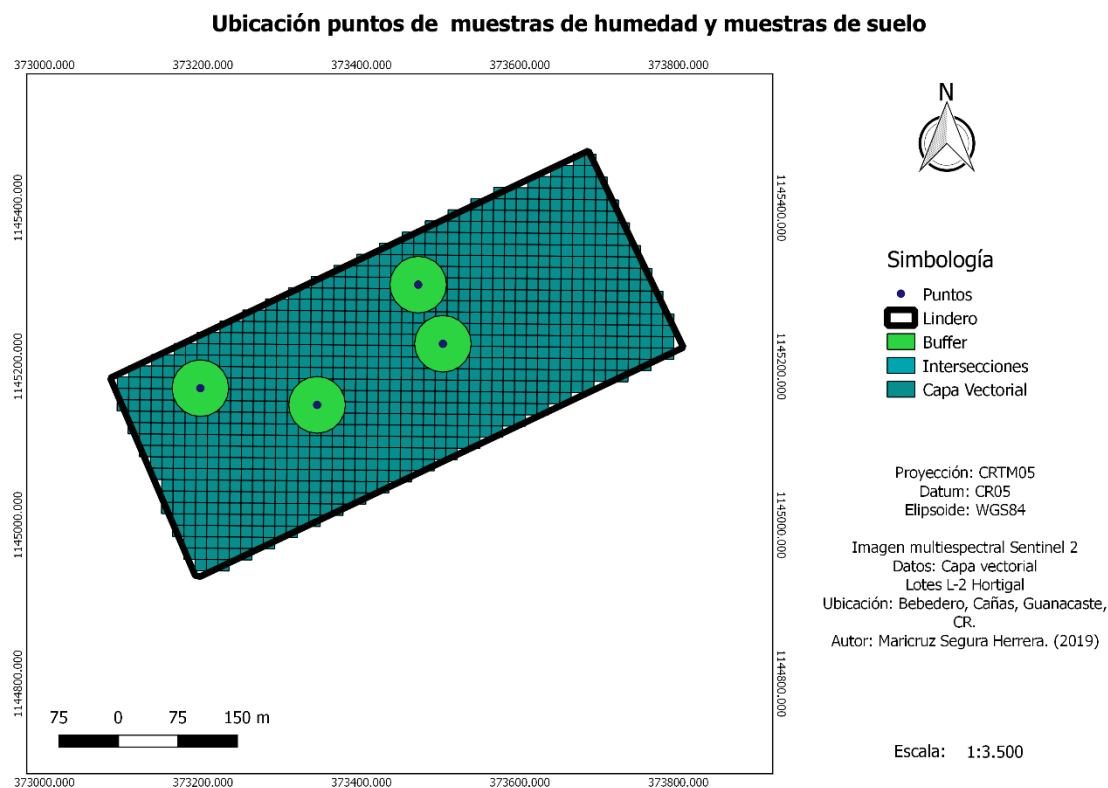


Figura 11. Mapa de capa vectorial de la sección Hortigal en Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).

El mapa anterior fue creado en el momento en el que se procesaban las imágenes, este mapa es una capa vectorial, dónde se transformó la capa raster a vectorial y además se le realizaron buffer de 25 metros para la obtención de la información de la tabla de atributos como se explicó en la metodología y en el mapa anterior (ver figura 16).

Para esta etapa se utilizaron varias capas para poder llevar a cabo el mapa. Las capas utilizadas son de puntos, un lindero del área, el buffer es el círculo de color verde que se muestra en este y en el otro mapa, capa de intersecciones y la capa vectorial.

4.4 Análisis Mapas de Índices Vegetación (NDVI) y Índices de Agua (NDWI).

4.4.1 Mapas de Índices Vegetación (NDVI)

Los índices de vegetación y agua se muestran en los siguientes mapas diseñados con imágenes multiespectral y escalas de colores alusivas a vegetación para color verde-naranja-rojo y amarillo o azul, celeste y blanco para índice de agua.

Para cada fecha se crearon 2 mapas, uno NDVI y NDWI. En total 14 mapas que se evaluaron y se pueden ver a continuación.

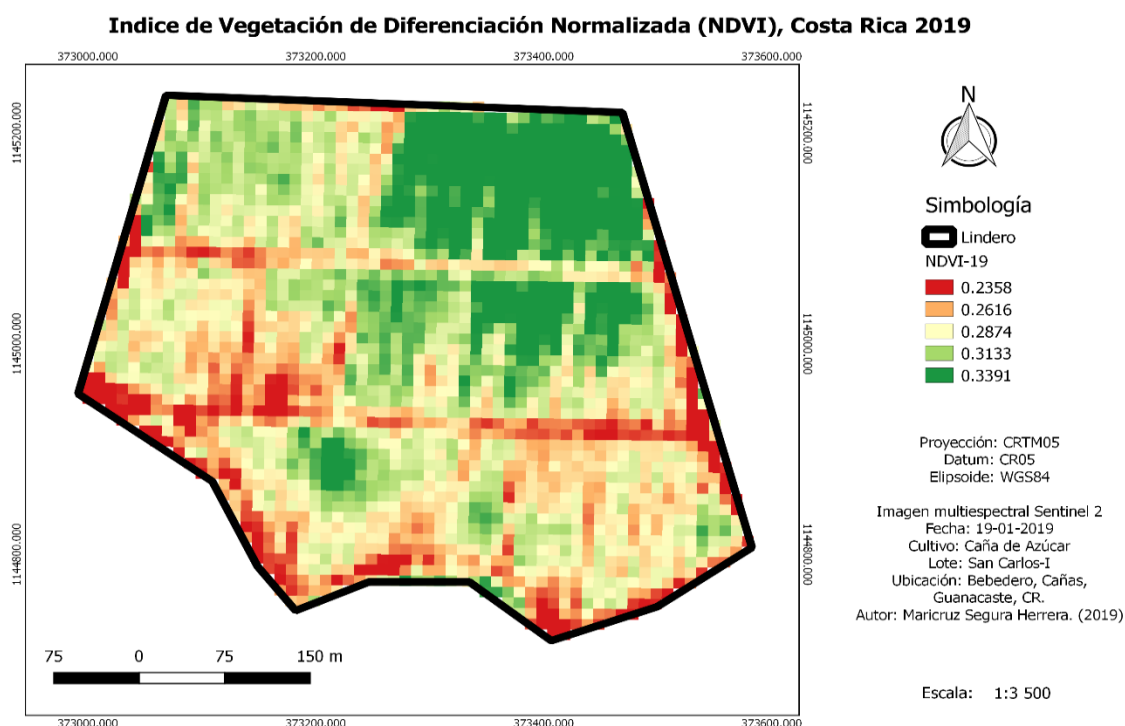


Figura 12. Mapa de NDVI del 19 de enero del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).

El mapa anterior de 19 de enero, de 30 días después de la cosecha mecanizada y un tamaño de 20 cm del tamaño de las plantas, se muestra una cobertura bastante escasa de un sector izquierdo. En la visita a campo, la parte de mayor aumento en vegetación, tiene una característica particular, de unos centímetros de suelo más alta que las demás.

Con un rango de 0.33, se encuentra la mayor densidad de vegetación. Sin embargo, ambos rangos son normales de buena salud o vegetación mediana. (Ver tabla 7).

Las partes de tonalidad rojas y naranjas muestran unos escasos de plantas y espacios con plantas vigorosas o saludables, pero menos desarrolladas que las que tienen un rango mayor a 0.3, sin embargo, no es una gran diferencia.

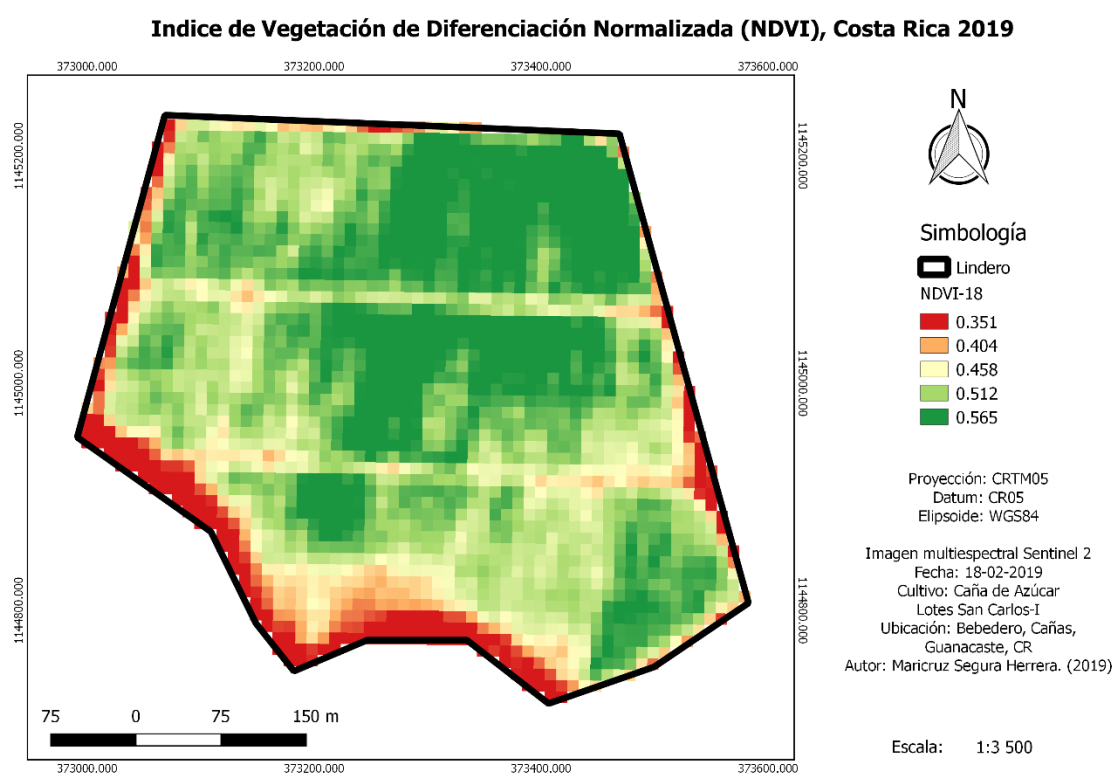


Figura 13. Mapa de NDVI del 18 de febrero del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga, Cañas, Guanacaste (2019).

Para la imagen procesada a 60 días después de la cosecha y con los cálculos de índice de vegetación, realza más la visualización de las plantas con mayor desarrollo y vigor que hace un mes atrás. El indicativo bien específico en un rango de 0.3 al ser el más bajo, pero no menos importante y el más alto con rangos de 0.5 en la vegetación que irradia la imagen, muestran un desarrollo importante durante el cambio de mes de evaluación. Por otra, parte las zonas con menor vigor y por ende menor desarrollo son los bordes del lote que normalmente quedan un poco desnutridas, afectadas por el paso de la maquinaria en la aplicación ya sea de abono o herbicida. Sin embargo, si se ve los rangos de NDVI, muestras una vegetación mediana a una vegetación alta de 0.5 que se encuentran en rangos normales de buena vegetación.

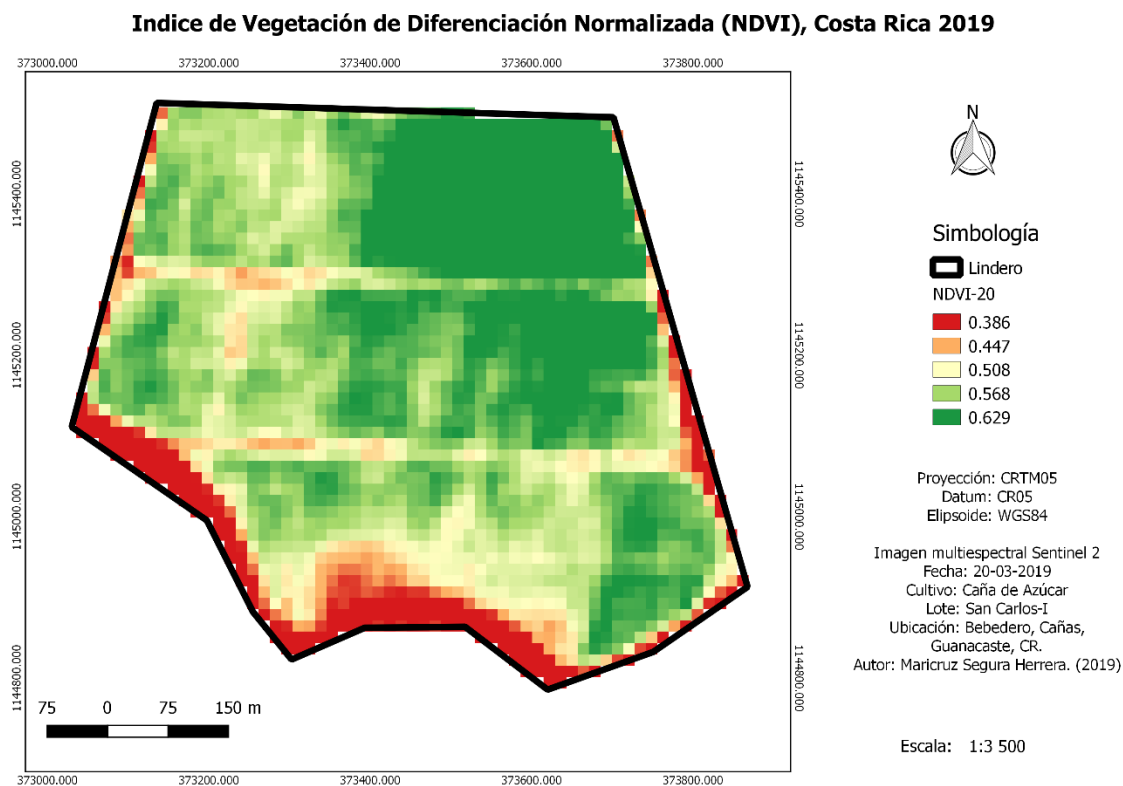


Figura 14. Mapa de NDVI de 20 de marzo del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).

Con respecto al índice de 20 de marzo al tercer mes a una edad de 90 días del cultivo se nota visualmente una variabilidad de vigor, el mayor rango de poblacional de NDVI es de 0.629, la coloración es más intensa aproximándose mayormente a 1 (ver en tabla 7). La reflectancia indica que se tiene una vegetación alta y saludable. Sin embargo, las orillas como se menciona anteriormente, la tonalidad más roja se denota las menos intensas de salud en rango de 0.3 donde se respalda una vegetación mediana. Es importante recalcar que estas partes como se menciona anteriormente se ve afectado por el arrastre de la maquinaria, durante su crecimiento por la maquinaria, lo que provoca que las plantas se desarrollen más lentamente.

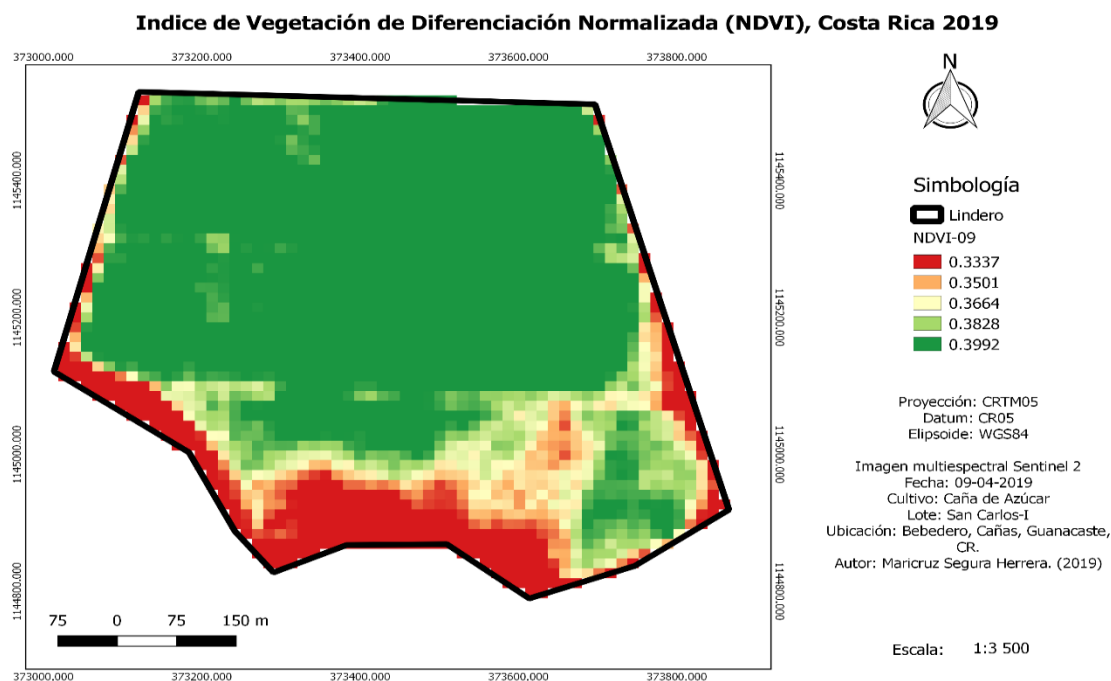


Figura 15. Mapa de NDVI del 09 de abril del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).

Para esta ocasión a 20 días después de la última imagen tomada y de mediciones de suelo, el índice de vegetación muestra una reflectancia menor a la que se presenta en la fecha anterior, viéndose ésta muy pareja para todo el lote. A una edad de cultivo de 114 días de edad se observa una clasificación de vegetación mediana o saludable en la que la variación del rojo se ve muy notable en las partes bajas donde se viene arrastrando el desarrollo más bajo del cultivo, cabe resaltar que los decimales de los índices son los que se mueven estos rangos y que la interferencia de uno a otro no es muy lejana puesto que el mayor rango llega a 0.4 si se utilizara solo 1 decimal.

Esta imagen 20 respectivamente, si tiene una diferencia con respecto a la imagen 19 anterior

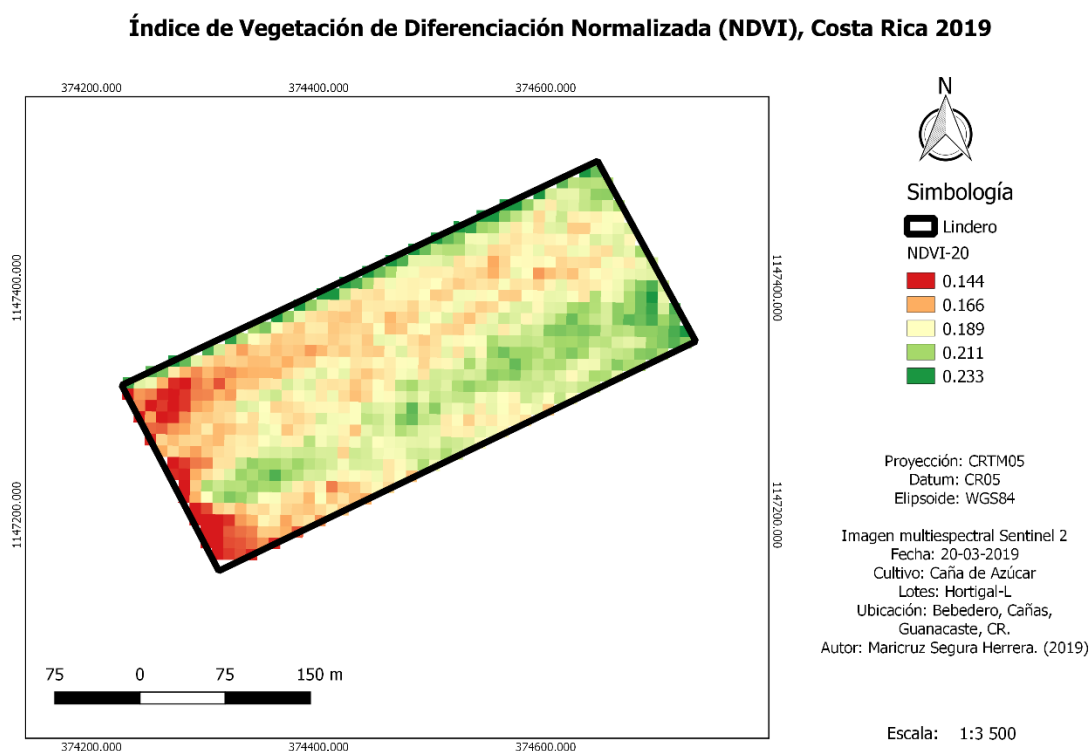


Figura 16. Mapa de NDVI de 20 de marzo del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).

En el análisis del mapa con tipo de suelo arcilloso, con la misma variedad BC 001220, el cual en los índices de vegetación indica un rango de reflectancia de 0.1 a 0.2, la cual muestra una vegetación ligera y muy escasa en la que se muestra el desarrollo de crecimiento en una franja más pequeña que se muestra en color verde. En la etapa de color verde que se marca con un rango de 0.2, un indicativo de desarrollo entre el rango saludable y de buen tamaño y reflectancia con coloración en sus hojas verdes.

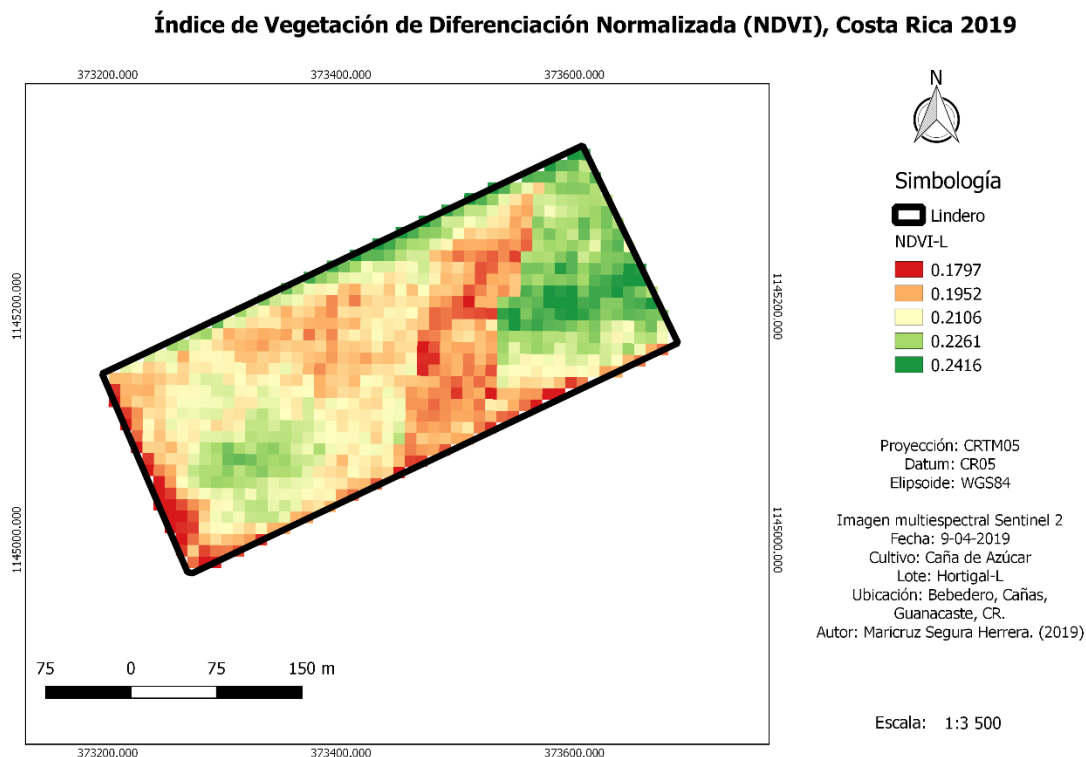


Figura 17. Mapa de NDVI de 09 de abril del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).

Para este mes se muestra un aumento en el desarrollo vegetativo del lote, sin embargo, su desarrollo es lento pero progresivo. Para la parte más reflexiva en tonalidad verde se tiene un rango máximo de 0.2 y un mínimo de 0.1 indicando, una vegetación ligera.

Cabe destacar que este lote tiene una siembra y la variedad es bastante lerda en emerger por lo que su desarrollo es lento y lo que crece se nota saludable.

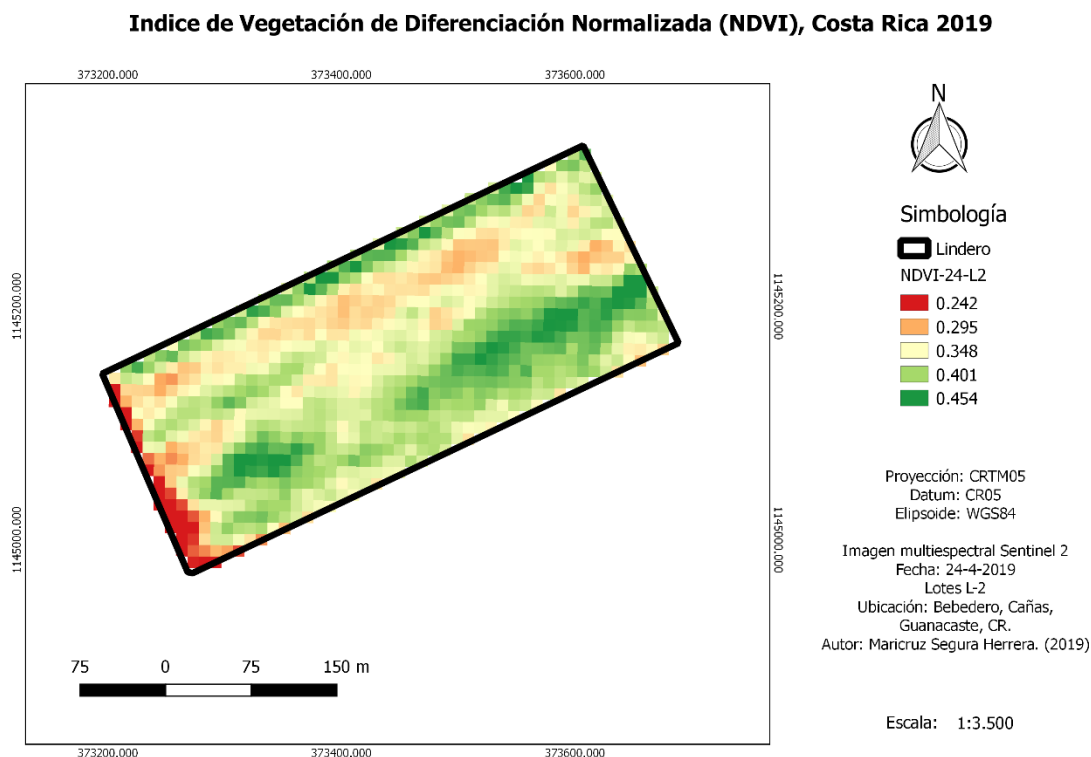


Figura 18. Mapa de NDVI de 2488 de abril del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).

Se muestra un desarrollo vegetativo bastante bueno, si se habla de crecimiento de cultivo y de salud de la planta en comparación a los otros 2 meses. El crecimiento que el lote ha tenido, los sectores más bajos en color naranja y rojo, son los que se muestran en un rango de 0.2 más el cultivo tiene vigor y ha progresado en tema de desarrollo. Su máximo rango es de 0.4, lo que indica buen follaje.

Es importante recalcar que estas variedades tienen un tipo de hoja que es bastante gruesa y que facilita la medición de los rangos de NDVI.

Además, en este caso se tuvo que llevar una medición más seguida debido al clima en este mes interfirió bastante en la obtención de los datos. La nubosidad es un factor importante a

la hora de toma de las imágenes del satélite. Debido a que se requiere claridad en el cielo para una mejor calidad en la imagen.

4.4.2 Mapas de Índices de Agua (NDWI)

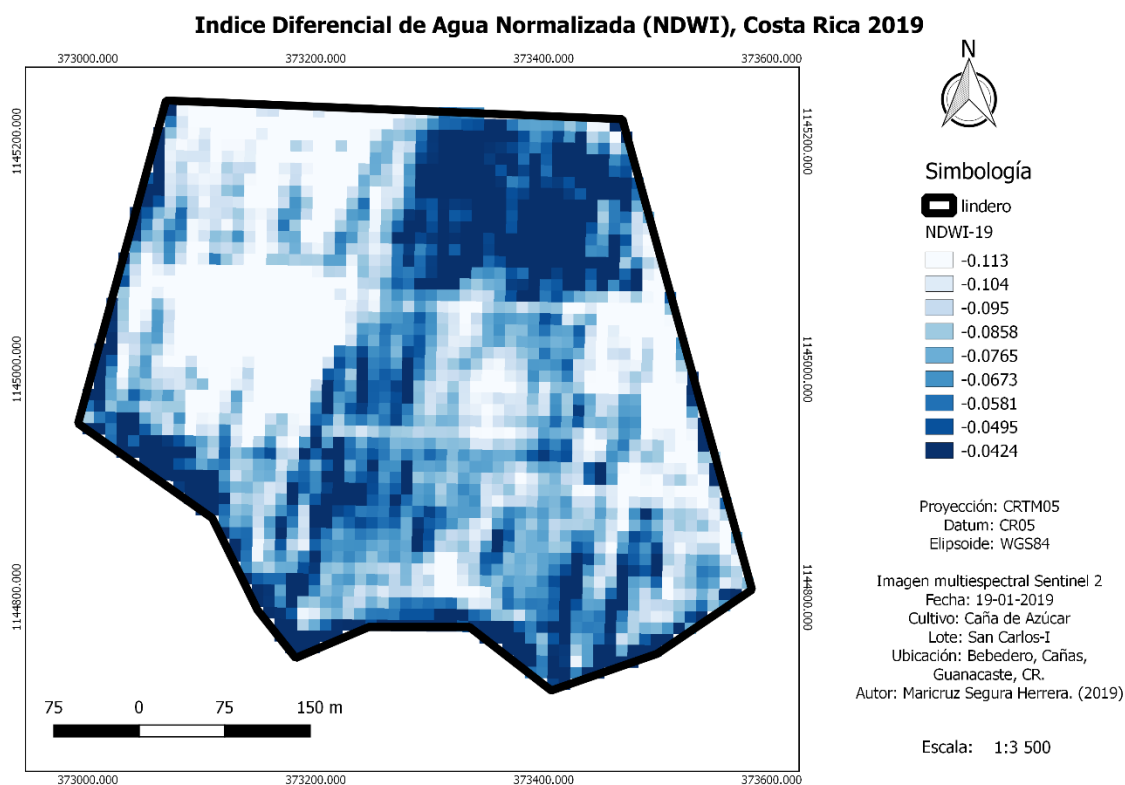


Figura 19. Mapa de NDWI del 19 de enero del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga, Cañas, Guanacaste (2019).

Por otra parte, para esa misma fecha se creó el mapa de NDWI (índice de agua) el cual muestra rangos por debajo del 0. El indicativo que presenta visualmente y según los cálculos para el NDWI, nos permite ver la baja humedad que presentan las plantas. Analizándolo desde el punto de vista del NDVI que la vigorosidad es un poco baja para esta fecha por lo tanto la humedad se comporta por debajo de -0, lo que indicado que se presenta en un estado de estrés hídrico por baja humedad de -0.113 y máximo de -0.04. Se denota un espacio en

color blanco o brillante lo que indica que no hay presencia de cultivo o el cultivo no se desarrolla lo suficientemente para generar un resultado con humedades. Debido a que las temperaturas del momento de la toma de las imágenes son elevadas puede repercutir el calor en las plantas haciendo que las humedades en ellas se pierdan. (Ver tabla 8)

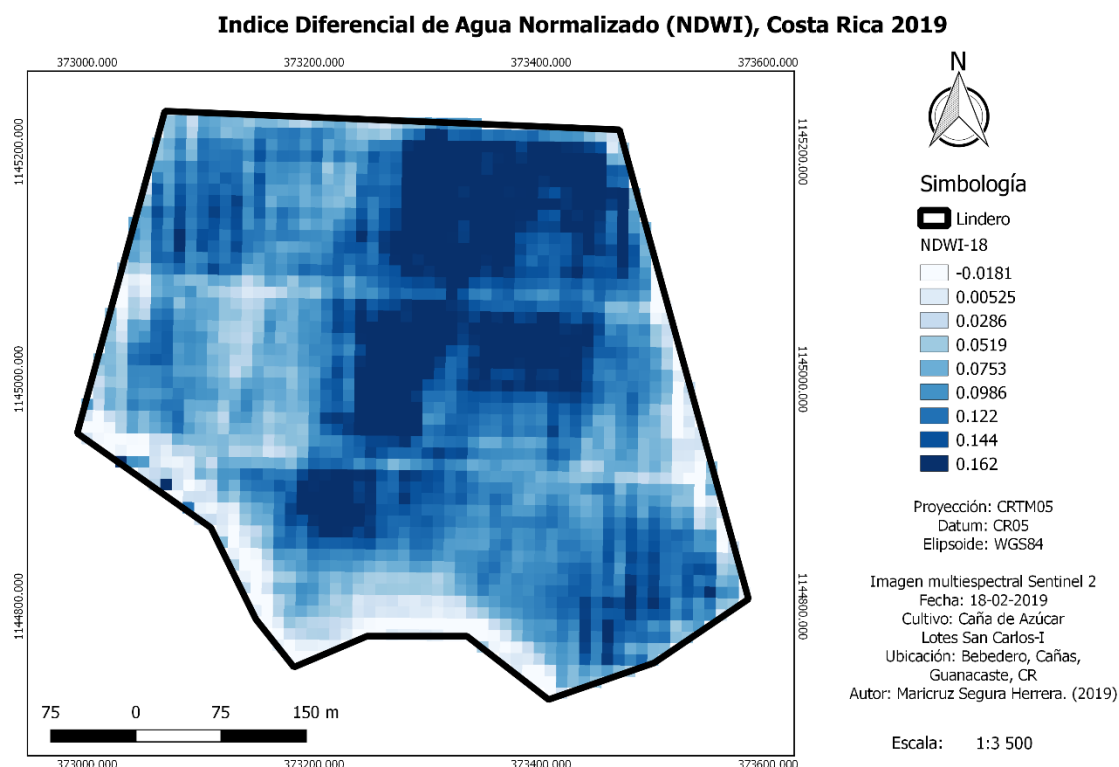


Figura 20. Mapa de NDWI del 18 de febrero del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga, Cañas, Guanacaste 2019).

Con similares condiciones en el movimiento de humedad en este mapa al del mapa de índice de vegetación, muestra como la reflectancia en distribución del agua es un poco menor. Para un rango fuerte de estrés hídrico, la humedad se encuentra en 0.162 siendo apenas y aceptable dentro de los rangos del índice de humedad en planta, pero que se mantiene en estrés, si se ve el rango más bajo en el caso del -0.0181 comprende una sección del lote donde

no presenta suficiente agua. Esta parte del lote está muy pegada a una zona donde pasa un río por lo que la humedad se pierde muy fácilmente sobre la base del río y el tipo de suelo que presenta el lote.

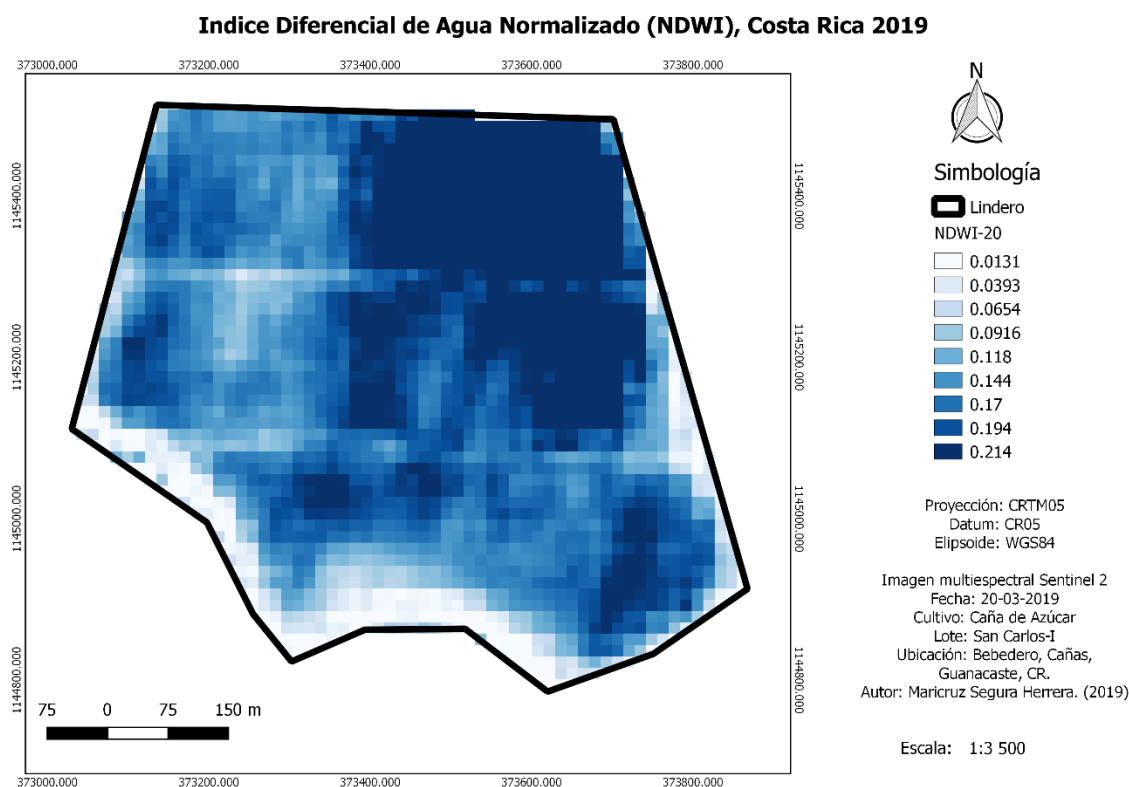


Figura 21. Mapa de NDWI del 20 de marzo del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).

Para la tercera fecha del mapa de agua se refleja una baja en la humedad para el cultivo las relaciones de las bandas NIR y SWIR, muestran un índice de cero a 0.2, cuando se encuentra en 0.2 tenemos presencia de agua y de vegetación, sin embargo, lo que implica un nivel de estrés máximo a alto con aumento de estrés en aquellas zonas cercanas a los drenajes y en la parte media y superior izquierda o (zona oeste) del mapa. (ver en tabla 8)

Lo que determina un grado de estrés en las plantas altas debido a que la variedad, es muy dependiente del agua y la zona tiene una característica particular de altas temperaturas.

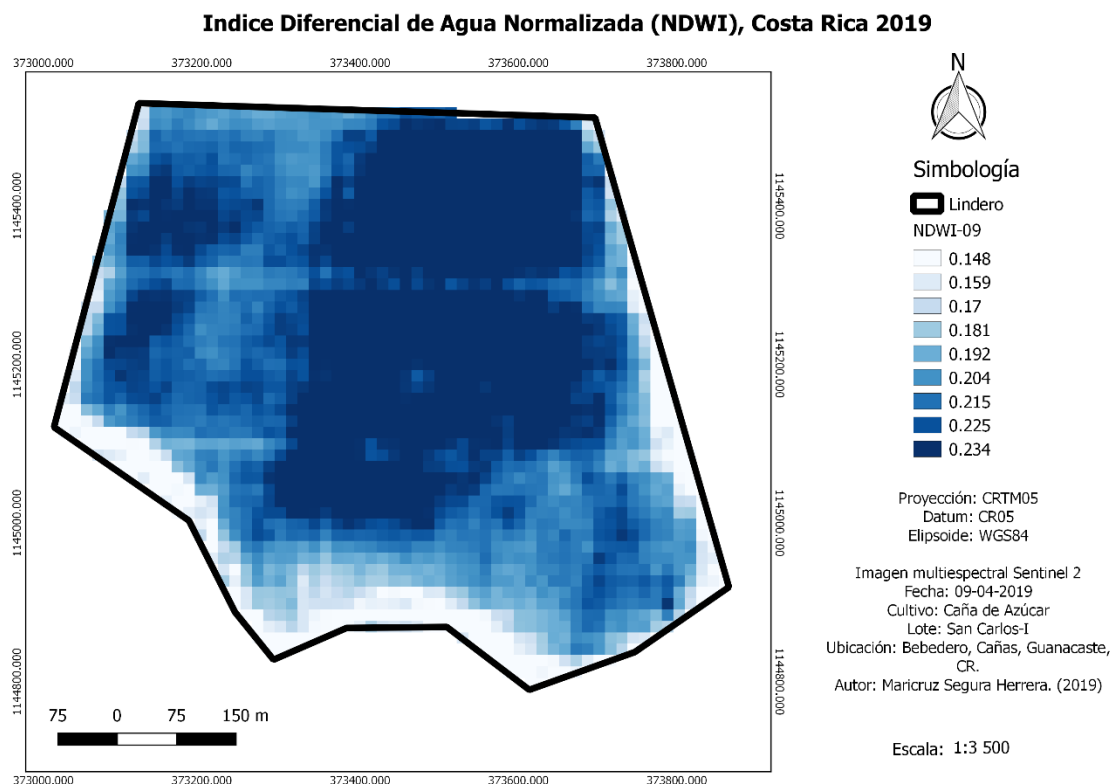


Figura 22. Mapa de NDWI de 09 de abril del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga S.A, Cañas, Guanacaste (2019).

De acuerdo con el análisis del mapa de NDWI, el indicativo de estrés hídrico sigue siendo extremadamente alto con rangos mínimo de 0.1 y máximo de 0.2. Este además puede verse influenciado por variaciones en vegetación y cultivo sometido a necesidades hídricas, debido a que las temperaturas son altas. A través de estudios realizados por expertos, dicen que cuando la planta llega a su punto de estrés o se somete bajo estrés hídrico, se presenta un deterioro interno a nivel estructural causando una cantidad más fuerte de reflectancia de la hoja de la planta. (Vogelman y Björn, 1984), ya que la reflectividad se incrementa debido a

que el índice de refracción de los materiales celulares secos es mayor que el de las células hidratadas (Carter, 1991).

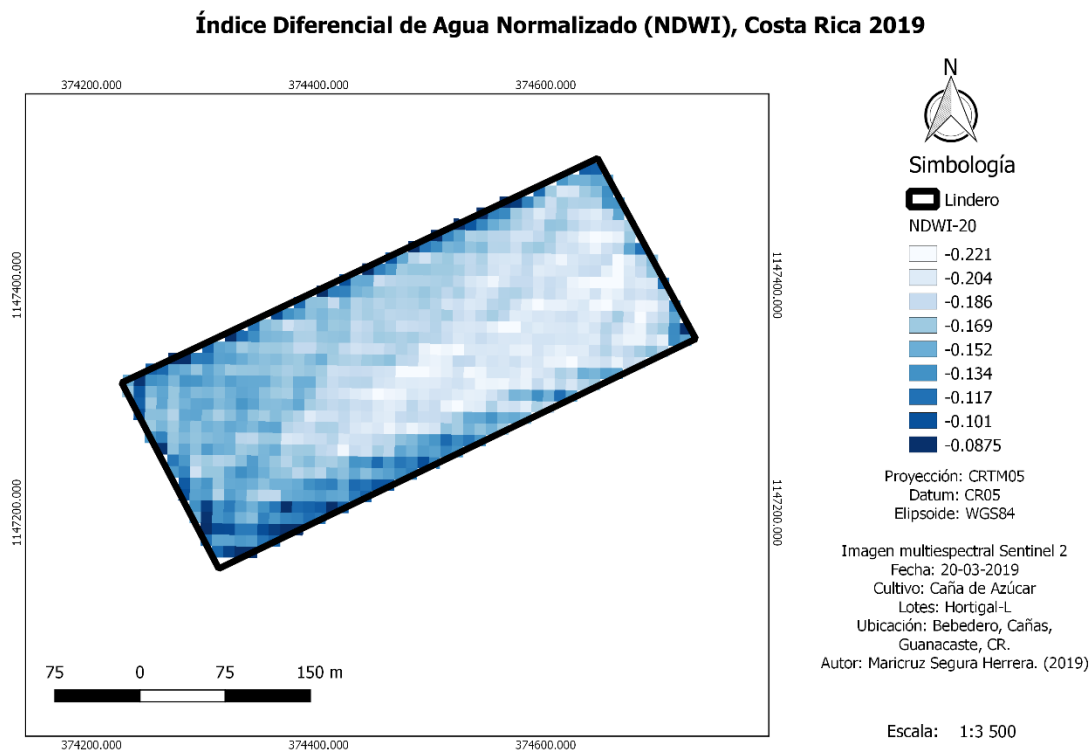


Figura 23. Mapa de NDWI del 20 de marzo del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).

En el caso del índice de agua para la edad de este cultivo puede notarse que todos sus rangos están menores a 0. El tamaño de las plantas a esta edad es pequeño, se observa una vegetación escasa y una humedad nula, lo que posiblemente esté respondiendo a un grado de vegetación muy baja.

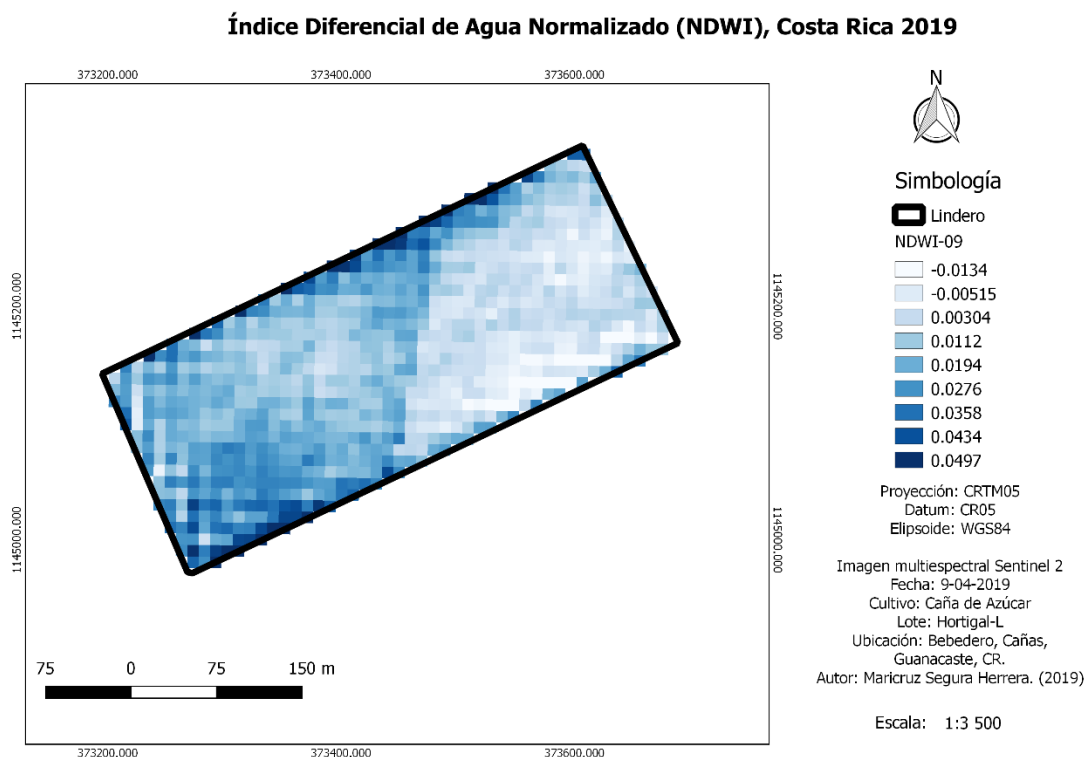


Figura 24. Mapa de NDWI de 09 de abril del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).

Se observa que prácticamente el lote en general se encuentra necesidad de agua y posiblemente escasas del cultivo. En el sector donde se muestra un rango de 0.04 es un indicativo de estrés máximo hídrico. Y sus rangos negativos muestran sequía, baja población. Sin embargo, el sector más azul es donde se almacenaría mayormente las aguas de riego. Posiblemente haya un mayor desarrollo vegetativo.

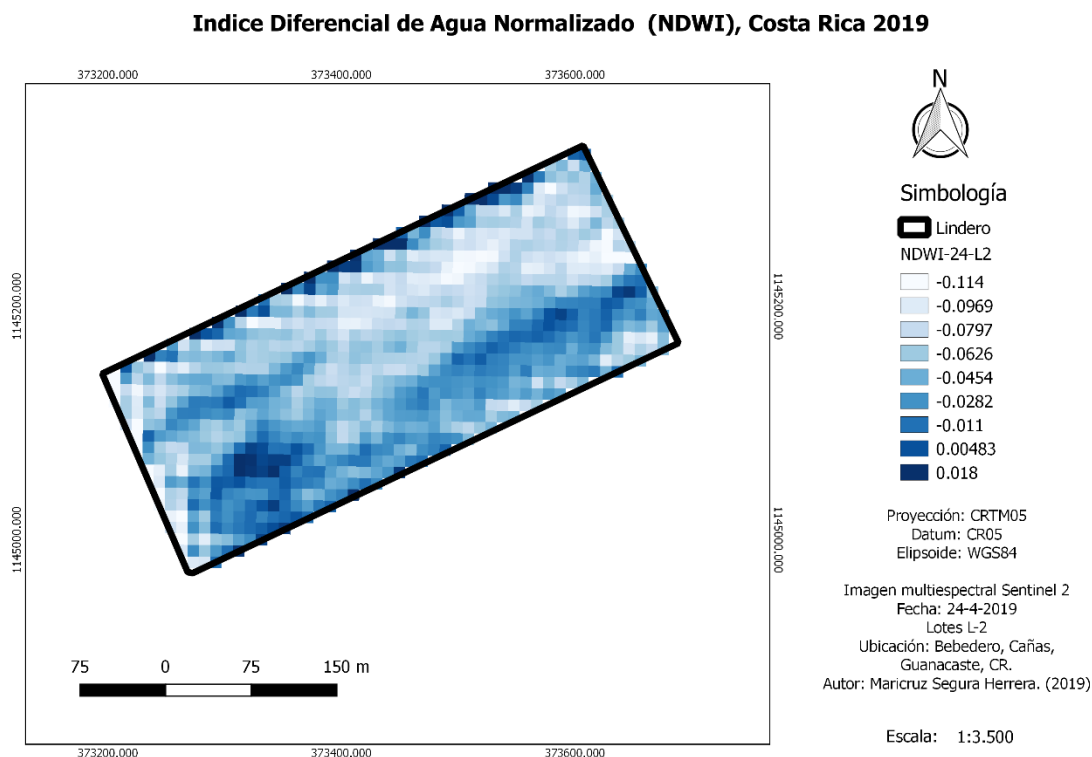


Figura 25. Mapa de NDWI de 24 de abril del 2019 con imagen multiespectral de Sentinel 2, Ingenio Taboga S.A, Bebedero, Cañas, Guanacaste (2019).

El mapa en su máxima muestra de rango cae a 0.01 el cual indica reflectancia de agua de las plantas, luego analizando el mínimo que se presentó es <0 en un rango de -0.01, el cual existe un nivel de estrés alto en las plantas, ya que para esta edad el cultivo está más denso y por las partes blancas poco desarrollados o presencia de suelo.

4.5 Datos de correlación entre índice de vegetación NDVI e NDWI contra humedad de suelo.

En la correlación de los datos de cada etapa de las imágenes se pudo determinar como resultado los “r” y los “r²” de los datos y la cercanía según cada dato a “1” en la que permite

conocer si su cercanía a uno el dato presenta una relación más fuerte, en caso de que se alejen de 1 la relación en menor.

Tabla 19. Datos de coeficiente de r y r² de la relación con humedad de suelo

Lote	Fecha	Eje x	Eje y	R	R ²
SC	19-ene-19	NDVI	Humedad (lámina)	-0.68	0.46
SC	18-feb-19			0.33	0.11
SC	20-mar-19			-0.60	0.36
SC	09-abr-19			-0.38	0.14
SC	18-feb-19	NDWI	Humedad (lámina)	0.35	0.12
SC	19-ene-19			-0.68	0.47
SC	20-mar-19			-0.62	0.39
SC	09-abr-19			-0.30	0.09

Lote	Fecha	Eje x	Eje y	R	R2
HO	20-mar-19	NDVI	Humedad (lámina)	-0.61	0.38
HO	09-abr-19			0.79	0.62
HO	24-abr-19			-0.74	0.54
HO	20-mar-19	NDWI		0.41	0.17
HO	09-abr-19			0.73	0.53
HO	24-abr-19			-0.47	0.22

Como resultados a la correlación, muestra que el dato más próximo o cercano a 1 en la zona de San Carlos en fecha NDVI del 19-01-2019 con una relación del r^2 de 0.46, lo que indica que la muestra tomada en campo y la respuesta de la reflectancia del índice de vegetación tiene una relación débil.

Para la zona de Hortigal se presenta un NDVI en la fecha del 09-04-2019 con un r^2 de 0.62, el cual muestra una relación significativa ya que es la que mayor se acerca a 1.

Los índices de agua o NDWI en la zona de San Carlos, corresponde a la más cercana el 19-01-2019 con un r^2 de 0.47 siendo una correlación débil de acuerdo al coeficiente de correlación los datos son bajos, pero tienen un grado de relación entre ellos.

De acuerdo con el valor más bajo en la zona de Hortigal de NDWI del 20-03-2019, se encuentra un r^2 el 0.17 lo que indica según la tabla de correlaciones que en esta etapa la correlación es nula, ya que no tiene ninguna fuerza en su relación de humedad del suelo con respecto a la humedad que indica el dato vectorial del índice de agua o NDWI.

4.6 Análisis de Gráficos

4.6.1 Gráficos de sección San Carlos Lote I

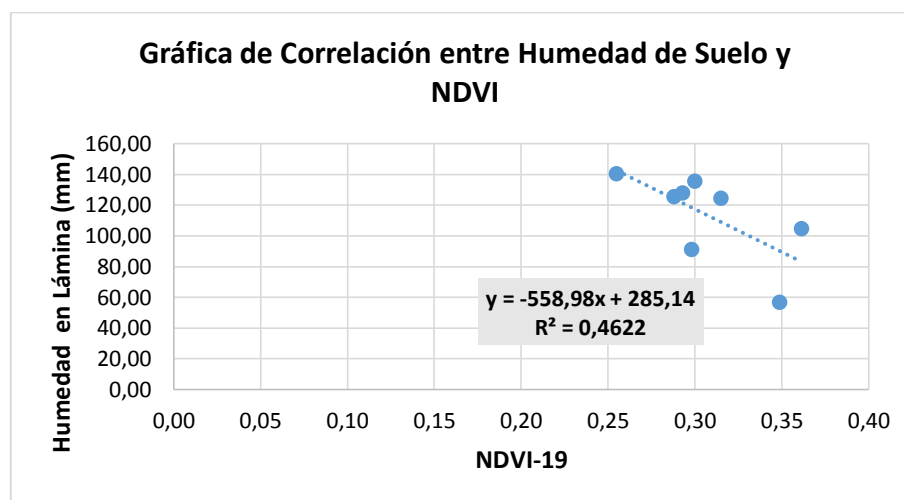


Figura 26. Correlación entre lámina agua y el NDVI-19 de enero del 2019.

Para la figura 29, según la relación entre el agua del suelo y los rangos de índice de vegetación con un r^2 :0.46. Este gráfico muestra que cuanto mayor es la humedad en el suelo mayor es el índice de vegetación.

Se observa que entre mayor cercano a 1, la relación es perfecta, sin embargo, la relación de ambos es débil según se muestra en la tabla 10.

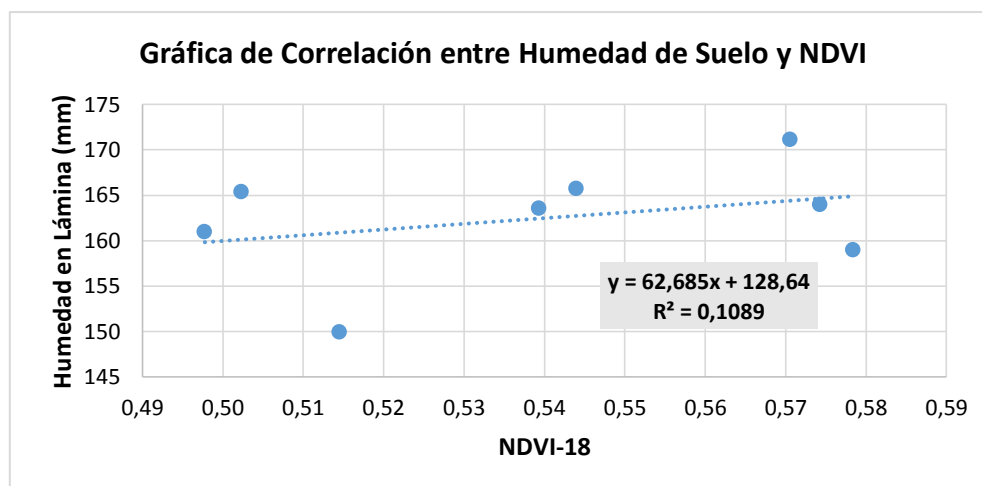


Figura 27. Correlación entre lámina de agua y NDVI-18 de febrero del 2019.

De acuerdo con la tendencia de la gráfica de correlación del índice de vegetación contra la lámina de agua indica que la aproximación del r^2 presenta una relación muy débil con respecto a la cercanía de un dato con el otro. Hay puntos en los que indica que a mayor cantidad de vegetación mayor es la cantidad de humedad en suelo, pero también se nota que a rangos un poco menores por ejemplo un índice de 0.5 se encuentra una humedad de 150mm donde también se encuentra buena vegetación. Por otra parte, se muestra un coeficiente de correlación positivo de $r = 0.33$, lo que sigue indicando una correlación débil para este dato.

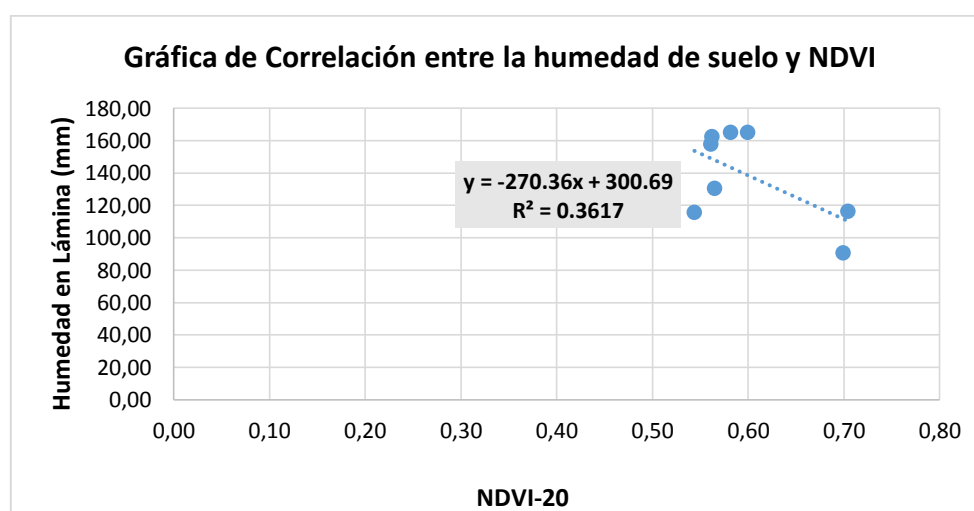


Figura 28. Correlación entre lámina de agua y el NDVI-20 de marzo del 2019.

Se denota en la gráfica de correlación de humedad y la NDVI para el tercer mes un indicativo de que a medida que aumenta el índice 0.70, se tiene una disminución de la lámina de agua en el suelo. Sin embargo, el coeficiente de determinación indica un $r^2 = 0.36$ para el grado de relación en ambas que según los rangos muestra un grado de asocio débil y además el coeficiente de correlación de $r = -0.60$, presenta una relación lineal inversa negativa lo cual quiere decir que la relación es moderada. Indicando que a mayor humedad en el suelo mayor es el índice de vegetación para el cultivo. Pero el nivel de confianza no necesariamente indicativo de que a mayor humedad mayor índice de vegetación.

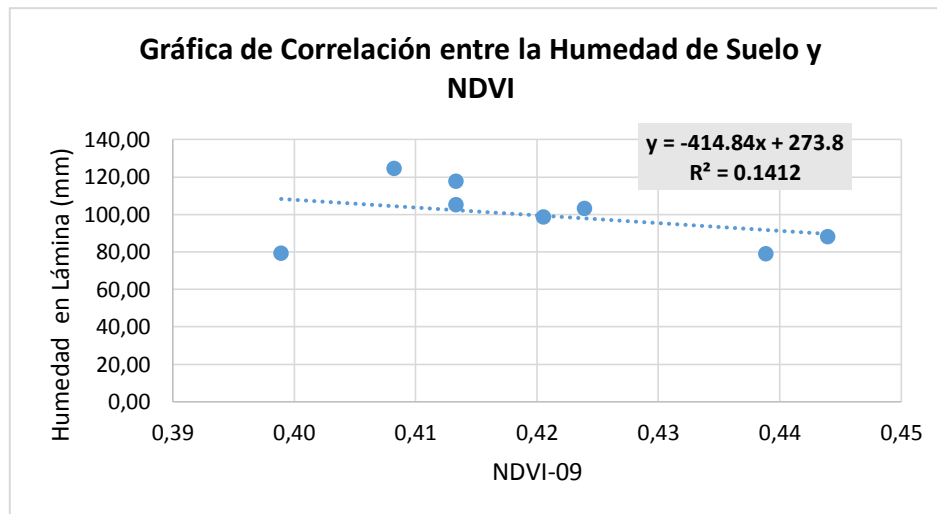


Figura 29. Correlación entre lámina de agua y el NDVI-09 de abril del 2019.

Los resultados obtenidos para esta cuarta imagen de relación de lámina con NDVI indica una relación inversa positiva que para la correlación con el $r^2 = 0.14$ señala una relación muy débil para esta sección conjunto con una correlación de Pearson de $r = -0.38$ lo que hace que las líneas se muevan separadas una de la otra. Lo que no hay certeza de decir que cuanto mayor sea el índice de vegetación menor va a hacer la cantidad de agua en el suelo.

4.6.2 Gráficos de lote Hortigal L con tipo de suelo Arcilloso

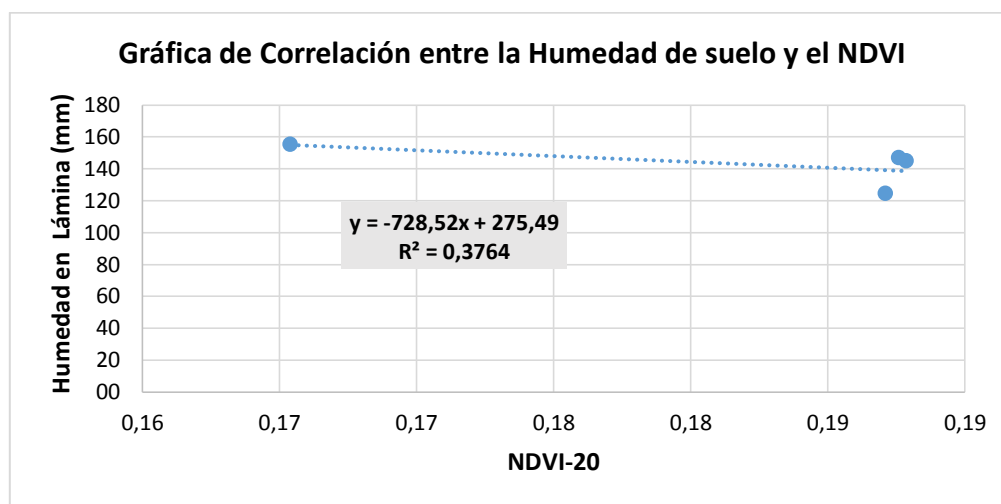


Figura 30. Correlación entre lámina de agua y el NDVI-20 de marzo del 2019.

Para la correlación de determinación arroja un dato de $r^2 = 0.37$ lo cual es un indicativo de una relación débil y que es una relación inversa negativa con $r = -0.68$ en este caso indicativo de que es moderada o media. Sin embargos ambas son distintas. Según lo que se observa en el gráfico se podría decir que a mayor índice de vegetación menor es la lámina de agua ya que al aumentar (x) va a disminuir (y).

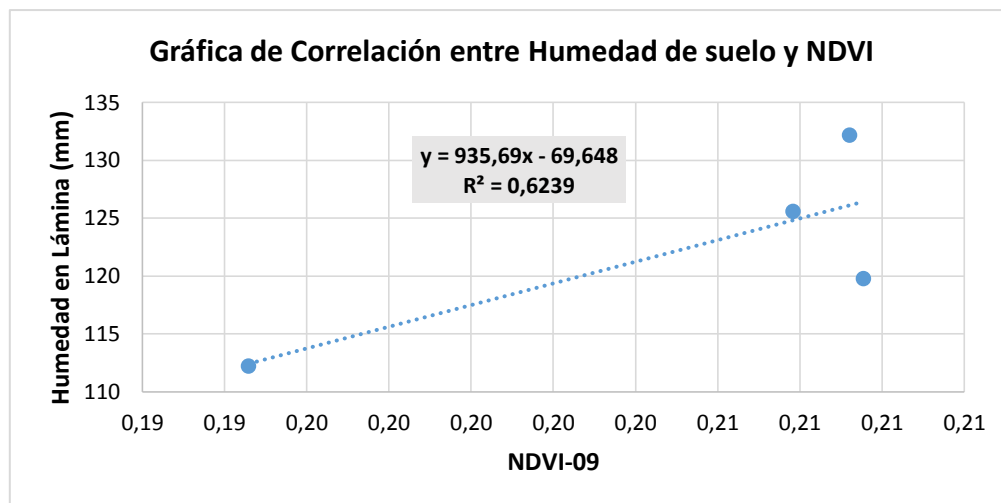


Figura 31. Correlación entre la lámina de agua y el NDVI-09 de abril del 2019.

Para la segunda etapa de medición de este lote, figura 39, indica un coeficiente de determinación denominado significativo según tabla 11, con un dato de $r^2 = 0.62$ en el cual al aumentar los datos del índice vegetativo también aumento el agua en el suelo. Con un coeficiente de correlación de $r = 0.79$ en el que se toma como un dato significativo. Se muestra una relación entre la humedad de suelo con la imagen satelital significativa o considerable.

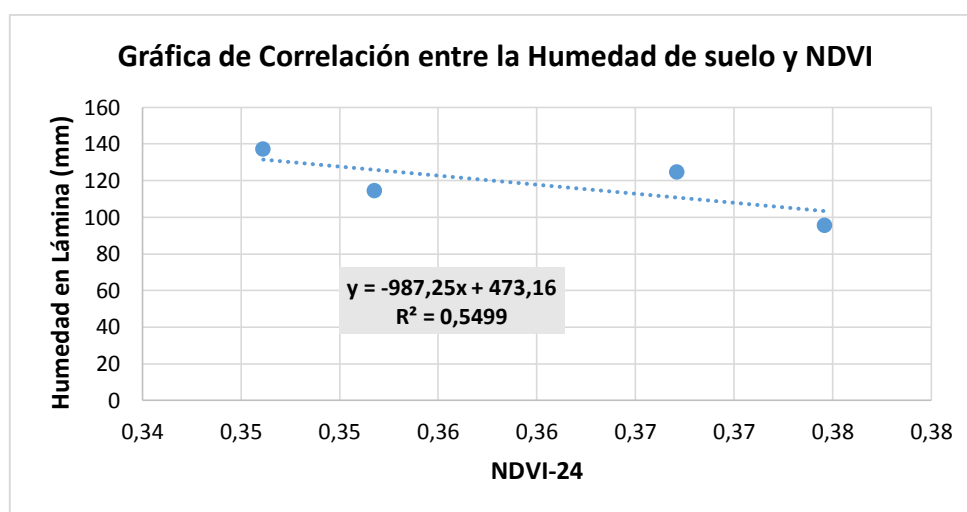


Figura 32. Correlación entre lámina de agua y NDVI-24 de abril del 2019.

En el caso de la última imagen procesada para la figura 41, de NDVI muestra una relación inversa negativa de la $r = -0.74$ en el cual se denomina como significativa, sin embargo, para el coeficiente de determinación se procede a ver un $r^2 = 0.54$ lo cual indica que a mayor sea el NDVI, menor será la lámina de agua en el suelo. Pero no se puede dar una certera información, ya que, en este caso, el coeficiente de determinación, es moderado y el r es correlación positiva media. Lo que se explica como una relación media entre el índice y el agua en el suelo.

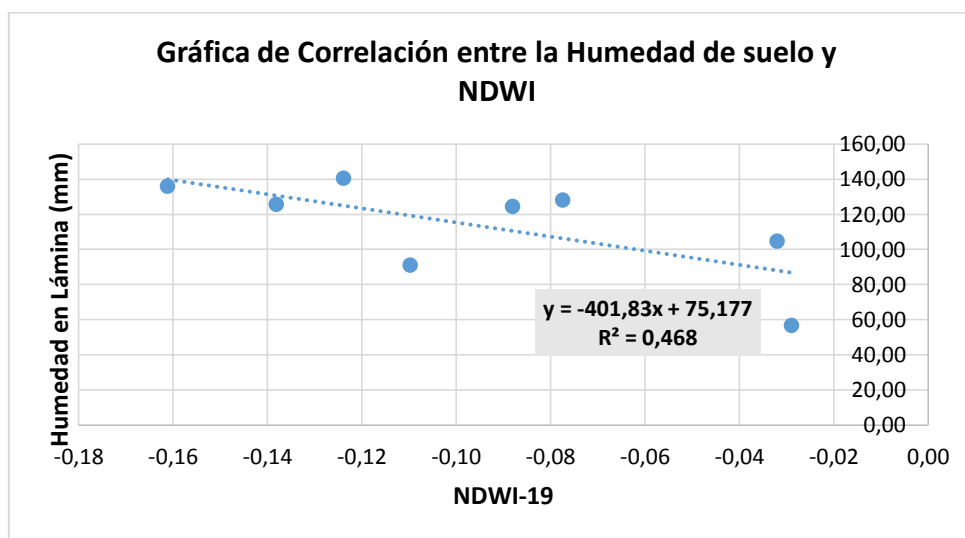


Figura 33. Correlación entre lámina de agua y NDWI-19 de enero del 2019.

Se muestra para el dato de la gráfica de la fecha de enero, según $r^2 = 0.46$ la cual muestra una correlación débil con respecto al índice de agua. Para una línea negativa en coeficiente de correlación muestra un dato de $r = -0.68$

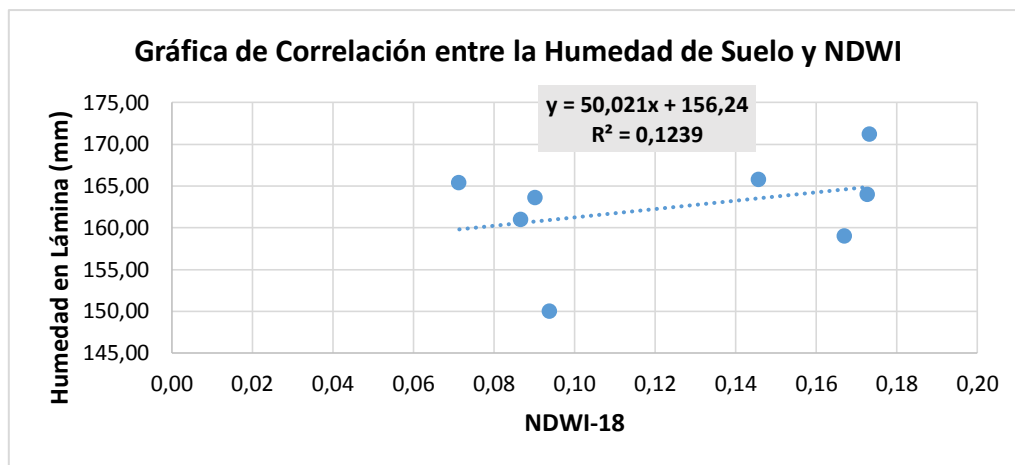


Figura 34. Correlación entre lámina de agua y el NDWI-18 de febrero del 2019.

Se muestra una relación con respecto al coeficiente de determinación es $r^2=0.12$ es positivo, aunque la correlación es débil, para este caso. Con respecto al $r=0.35$ que además también es positivo pero que su correlación sigue siendo débil. Mostrando puntos que indican que en humedades altas también hay indicativo de estrés hídrico.

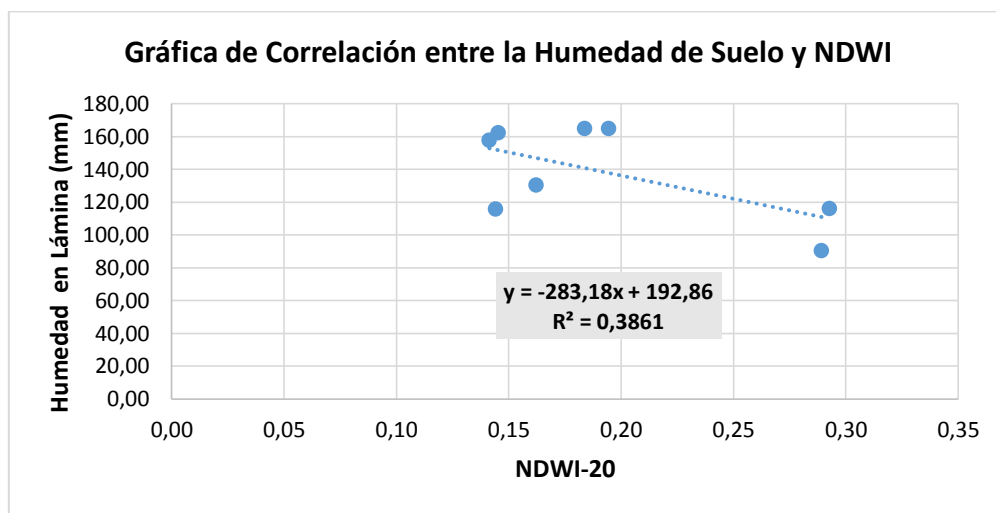


Figura 35. Correlación entre lámina de agua y el NDWI-20 de marzo del 2019.

En la correlación entre la lámina de agua y el índice, esta muestra una relación lineal inversa en la gráfica. Para un $r^2= 0.38$ el cual indica una relación débil. En la que el indicativo es que entre más aumenta el índice de agua en la planta (eje x), más disminuye el agua en el

suelo (eje y). Además, se tiene una correlación de Pearson lineal negativa $r = -0.62$ lo que indica que es negativo sin embargo este muestra una correlación moderada.

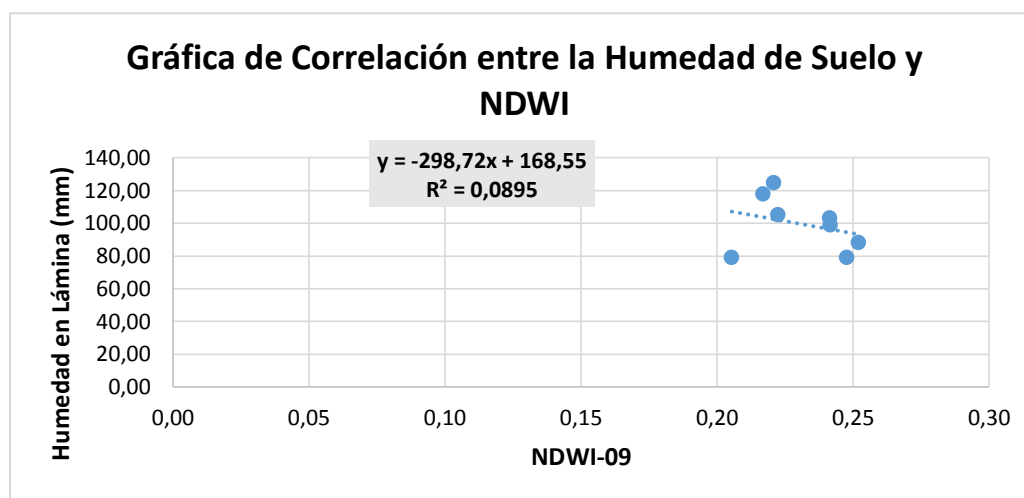


Figura 36. Correlación entre lámina de agua y el NDWI-09 de abril del 2019.

Para esta gráfica la correlación que denota es nula, debido a que posee un $r^2 = 0.08$, el cual muestra que no hay relación entre el índice de agua y el agua que se encuentra en el suelo. Además, muestra un $r = -0.30$ indica que es débil en el cual aquí explica una relación lineal negativa, lo que causa que ambas variables se muevan por separado y no causen una relación conjunta entre sí.

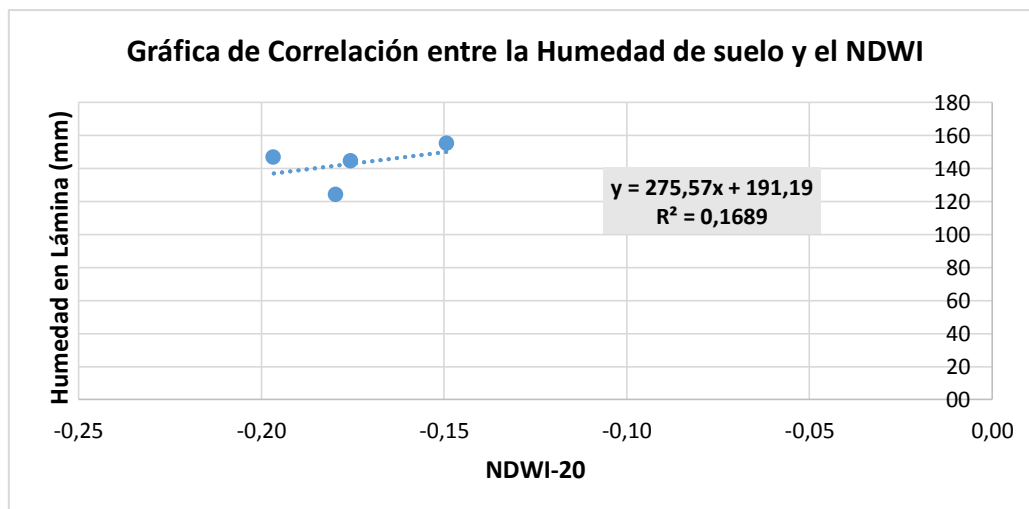


Figura 37. Correlación entre la lámina de agua y el NDWI-20 de marzo del 2019.

En el caso del lote L para el análisis del NDWI en la figura 38, se observa que a menor NDWI, mayor en la lámina de agua en suelo. Muestra un coeficiente de determinación de $r^2 = 0.16$ con una relación débil y además el coeficiente de correlación lineal directa con $r = 0.41$ que tiene una consistencia positiva en la cual se ubica en los parámetros de débil.

Esta correlación muestra una relación no confiable para dar una certeza que las variables se consideran acertadas.

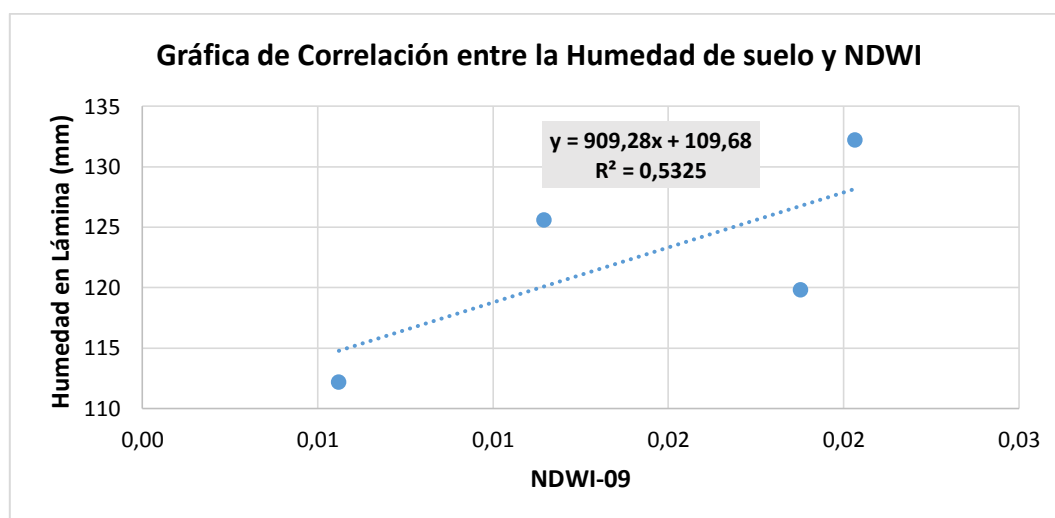


Figura 38. Correlación entre lámina de agua y el NDWI-09 de abril del 2019.

En el caso de la figura 40, tiene una relación de a menor NDWI, menor es la humedad en suelo, el gráfico se presenta con una relación lineal directa con un coeficiente de correlación de $r = 0.73$ mientras que con el coeficiente de determinación de $r^2 = 0.53$ para la cual se determina que ambas son positivas y que hay una ligera relación. Lo que según la tabla 10, la relación es media, puesto que su cercanía a 1 es poca.

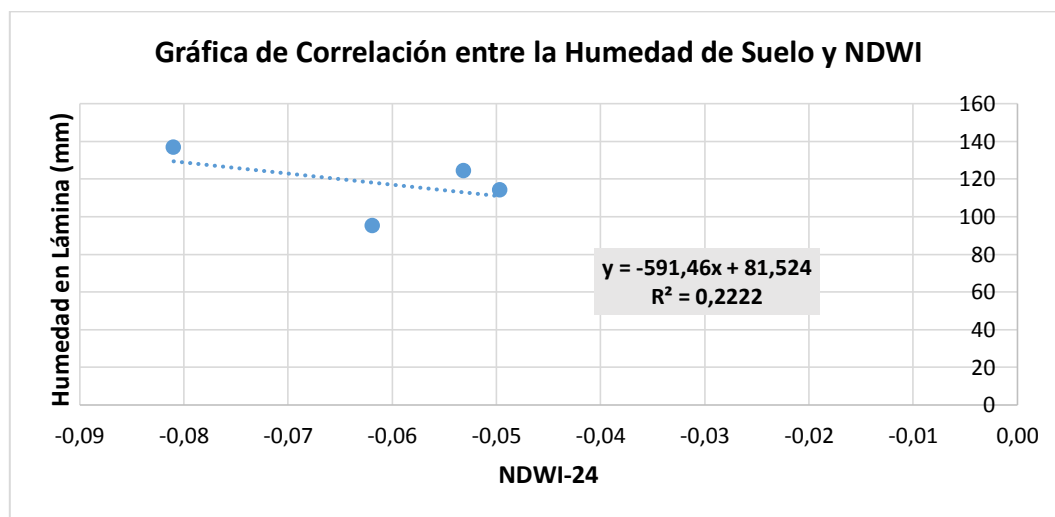


Figura 39. Correlación entre lámina de agua y el NDWI-24 de abril del 2019.

En el caso del índice de agua y la correlación con la lámina de agua. Indica que a mayor NDWI, menor es la lámina de agua en el suelo. El punto en el que el coeficiente de determinación es $r^2 = 0.22$ según el ajuste no es bueno, debido a que el r^2 se aleja mucho de 1, donde 1 sería una correlación perfecta y los rangos que se obtienen en este gráfico, es débil, quiere decir que en porcentaje se mide como un 22% de la variabilidad de la “y”, además en el caso del coeficiente de correlación de Pearson $r = -0.47$ lo que demuestra una relación lineal negativa y débil, para este gráfico.

4.7 Correlación entre los índices NDVI y NDWI de la Sección San Carlos

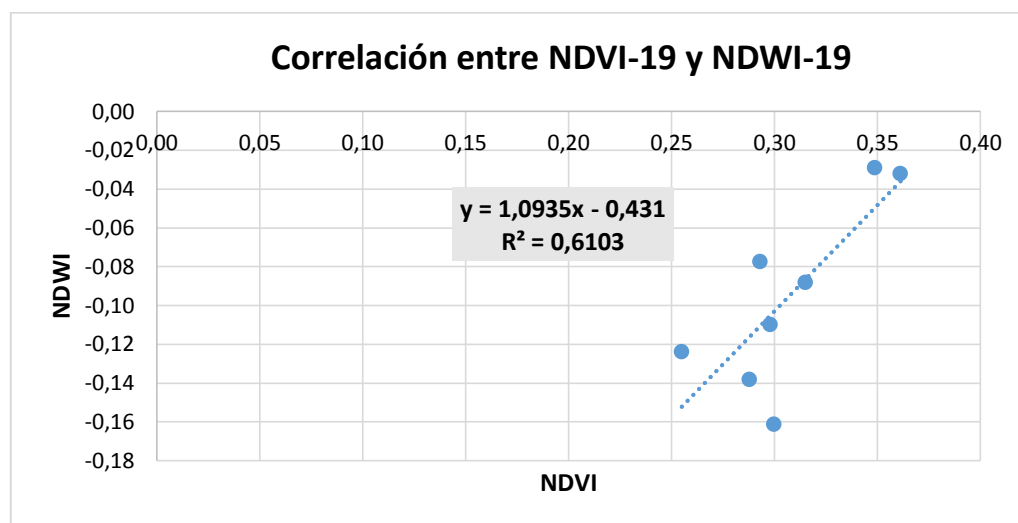


Figura 40. Correlación entre el NDVI y el NDWI-19 de enero del 2019.

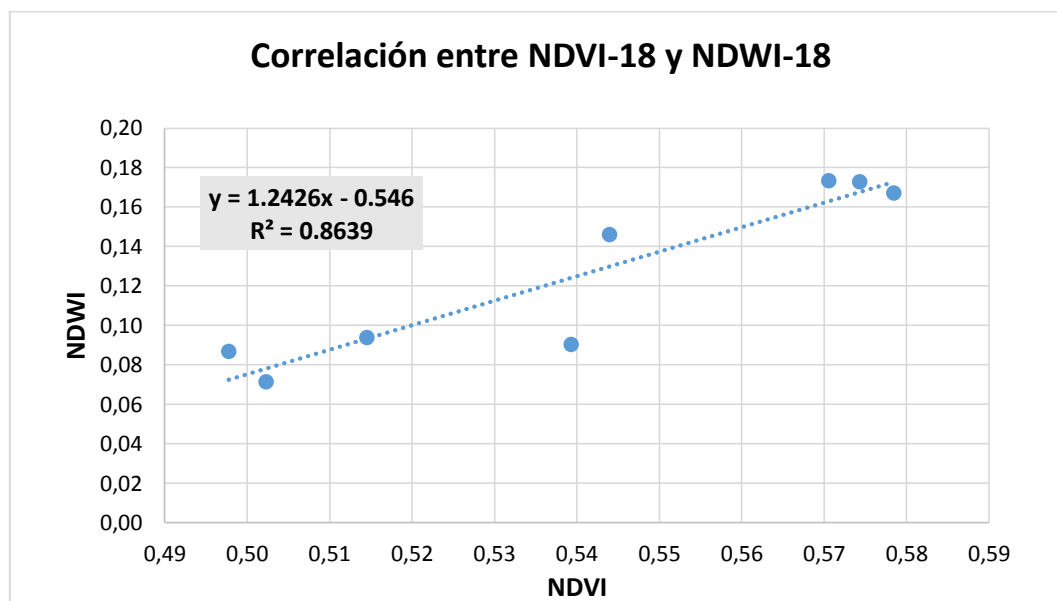


Figura 41. Correlación entre NDVI y el NDWI-18 de febrero del 2019.

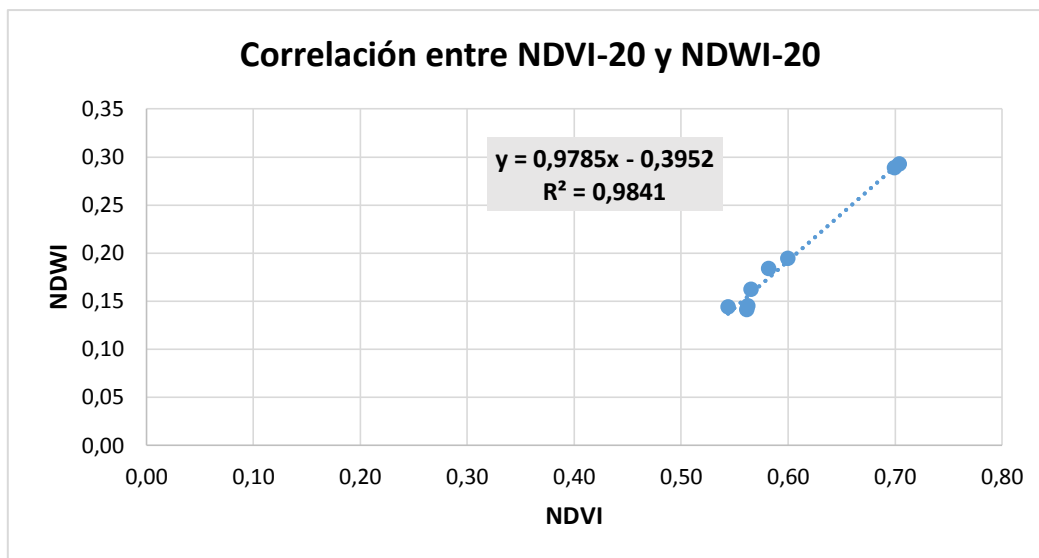


Figura 42. Correlación entre NDWI y el NDWI-20 de marzo del 2019.

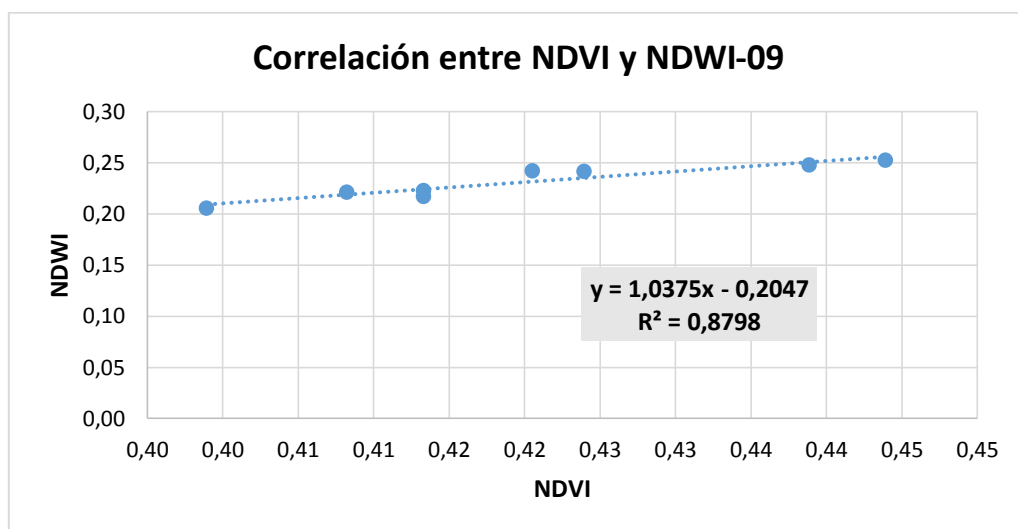


Figura 43. Correlación entre NDVI y el NDWI-09 de abril del 2019.

En esta correlación de la figura 43, 44 y 45, se obtiene una relación que indica que a mayor NDVI, se tiene mayor NDWI. Es muy similar a lo que se observa en campo y como se ve reflejado en cada uno de los mapas en la sección de San Carlos y como se ha movido el desarrollo en suelos francos.

Se aprecia una relación directa de la vegetación con el agua con r^2 de 0.8 a 0.9.

4.8 Correlación entre los índices NDVI y NDWI de la Sección Hortigal

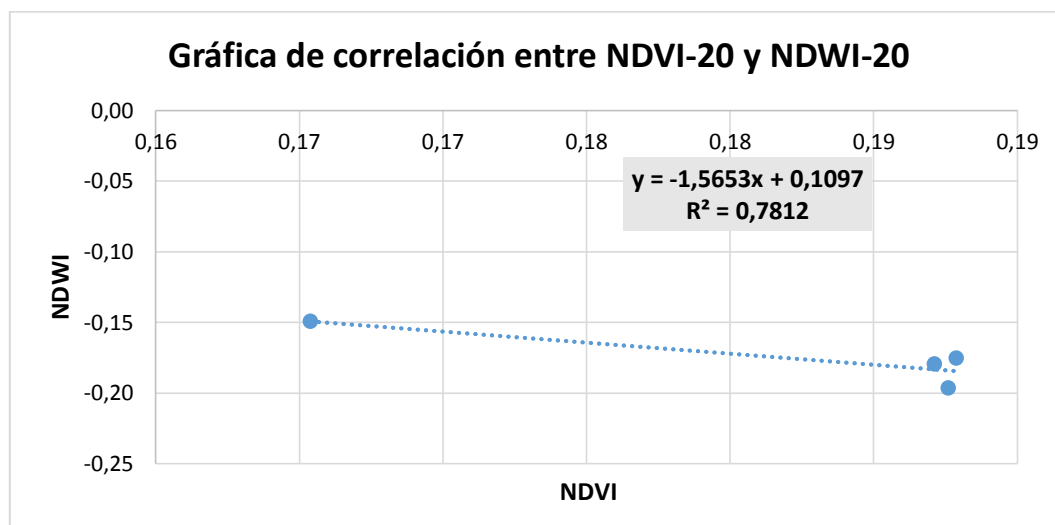


Figura 44. Correlación entre NDVI y el NDWI-20 de marzo del 2019.

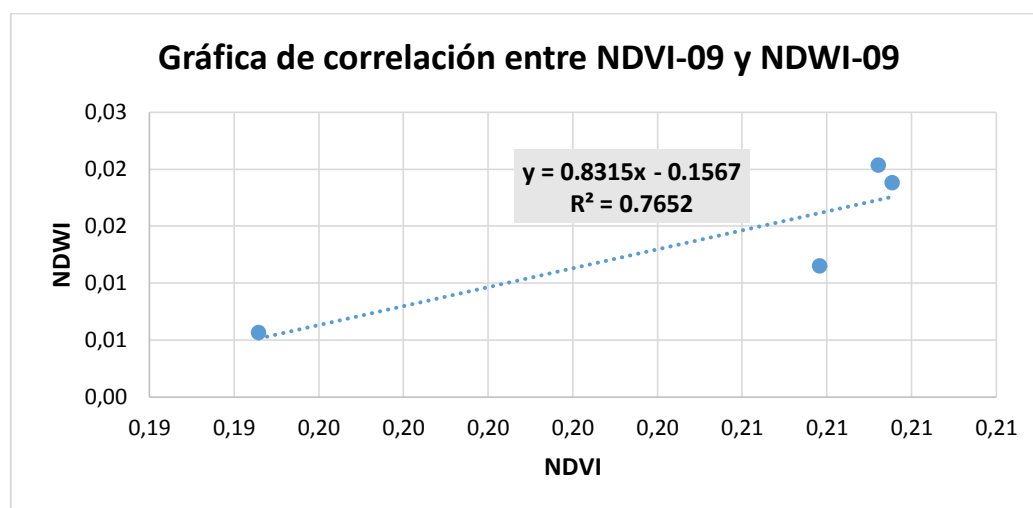


Figura 45. Correlación entre NDVI y el NDWI-09 de abril del 2019.

En la figura 47 y 48, se aprecia una relación directa del NDVI y el NDWI, esto quiere decir que a mayor NDVI mayor es el NDWI.

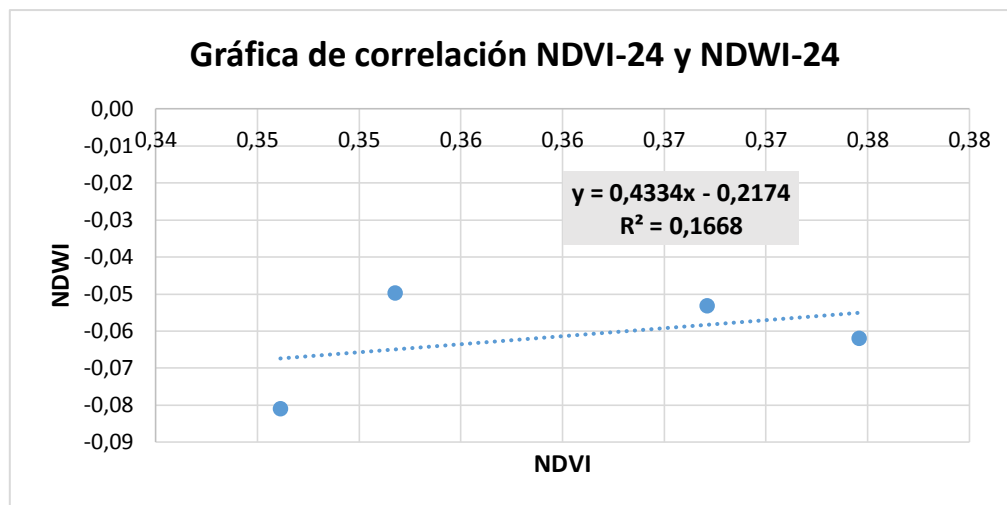


Figura 46. Correlación entre NDVI y el NDWI-24 de abril del 2019.

Para esta sección de la figura 49, se obtuvieron datos de correlación del NDVI entre el NDWI, que muestra una relación bastante dispersa y sin un r^2 , aceptable para mencionarlo como una correlación ligada entre el dato de NDWI y NDVI.

La imagen de 24 de abril, muestra una correlación nula, ya que no se presenta un dato cercano o muy bajo de acuerdo a la tabla. En esta imagen puede que la nubosidad cause algún problema en la reflectancia de la imagen. En este punto se tiene una vegetación que llega hasta 0.3 la densidad vegetativa del (NDVI), se muestra muy por debajo de 0 en índice de agua (NDWI).

4.9 Discusión de resultados

Para el análisis de estos rangos en correlación de lámina versus índices, se obtuvo un r^2 máximo de 0.6 para NDVI y un mínimo de 0.11. Además, para el NDWI (agua) con un máximo de 0.53 y un mínimo de 0.09 de rangos. En este caso la relación es bastante compleja porque si se analiza ejemplo del primer mes para el índice de vegetación con un $r^2 = 0.46$ y un coeficiente de correlación de Pearson, $r = -0.68$ que indica una correlación moderada, no

lo suficiente para alcanzar una alta relación y aproximarse a 1. Mostrando una relación lineal inversa.

Se realizó una comparación de la humedad de suelo contra los rangos pertenecientes al área de CC y PMP de los lotes, los cuales dieron un indicativo de que al momento de la toma de las muestras los lotes se encontraban a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente.

Los mapas de NDVI, variaron de acuerdo a los meses del crecimiento del cultivo, donde se tiene un índice de vegetación en aumento mes a mes y después del segundo mes donde había mayor tamaño de la hoja y de la planta o NDVI, mostrando un índice más alto en el tercer mes, y manteniéndose para el cuarto mes.

Para el NDWI en San Carlos, inició con un mapa escaso de vegetación y humedad lo que la posiblemente fuera que el cultivo se encontraba muy pequeño. Conforme pasaron los meses fue aumentando, sin embargo, los datos no son muy altos y para la edad de cultivo para presentaban estrés hídrico, si la observamos desde el punto de vista del mapa.

Los demás resultados en los gráficos de las fechas siguientes muestran un rango de $r^2=0.1$ donde indica una baja correlación entre la humedad de suelo y los rangos de los índices.

Al correlacionar los índices entre sí, con datos meramente de la imagen satelital, indica una alta correlación entre los datos.

Las plantas directamente juegan un papel importante en la toma para la evaluación de la humedad, ya que la idea es saber si el cultivo posee la suficiente humedad necesaria y no atraviesa por un indicativo de estrés hídrico el cual el suelo no facilita esa información tan exacta.

V. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

- Las características físicas de suelo para la sección de San Carlos, presentan una textura franco arcillosa y de orden inceptisoles, con densidad aparente acorde a este tipo de suelo, y una porosidad alta por lo cual no presenta problemas de compactación. Indica la movilidad que el agua puede tener un suelo con esta textura lo que prueba que fácilmente se almacena la humedad en el suelo y también proporciona un fácil drenaje.
- Para la zona de Hortigal, el suelo es de textura arcillosa y de orden Vertisol, su densidad aparente es media, entre los rangos establecidos y presenta una porosidad alta.
- En suelos con texturas más densas o pesadas como arcillosas, ocasionan una retención de agua y una prolongación de mayor tiempo en el suelo, lo que facilita la disponibilidad de agua para las plantas, sin embargo, si la densidad poblacional es baja, el agua se mantendrá en el suelo y será difícil observarlo en la vegetación.
- Los índices de vegetación y de agua resultan una buena herramienta para observar el desarrollo de la planta y además la de tener una valoración del movimiento del agua en el cultivo a nivel foliar.
- Los mapas de índices son una herramienta para determinar posibles problemas que estén sucediendo en el cultivo y así poder realizar la visita a campo y verificar problemas de bajas densidades poblacionales, suelos desnudos, excesos y/o faltantes de agua en la zona.

- Los NDVI y la lámina de agua dispararon un indicador inverso en cuanto a sus correlaciones, indicando que entre menor sea la lámina de agua mayor será el NDVI. Lo que de acuerdo con los mapas cabe la posibilidad de que se deba que el agua que se encuentre en su capacidad de campo permita un NDVI en rangos normales y disminuyendo en algunos casos por la edad del cultivo, sin embargo, no quiere decir que, aunque haya agua en el suelo se va a presentar directamente en la planta puede que se la esté proporcionando en pequeños tractos o bien que el suelo tenga mucha agua y está no sea absorbida por la planta, afectándola.
- La correlación entre el NDVI y lámina de agua en la zona de San Carlos no fue significativa según la relación del coeficiente de correlación, establecidos por Pearson en las que indicaba que a mayor cantidad de agua mayor sería el índice de vegetación.
- No se puede demostrar que haya una correlación directamente significativa entre el NDVI y lámina de agua del suelo en ambos casos, ya que, los datos con el método realizado no demuestran una inferencia entre las variables según lo establecido en la hipótesis, debido a los coeficientes de correlación son bajos. A pesar de que hay una tendencia igual entre ambas variables lo que no permite ver claramente una afectación por estrés hídrico.
- No se puede demostrar una correlación directamente significativa entre el NDWI y la humedad del suelo en ambos casos, ya que los datos no demuestran una inferencia entre las variables, debido a los coeficientes de correlación son bajos. A pesar de que hay una tendencia igual entre ambas variables, no se muestra una dependencia entre sí.

- Al correlacionar entre ambos índices NDVI y NDWI, hay una alta correlación entre las variables determinado que, tienen una relación muy significativa entre sí. Lo que indica que, entre mejor se encuentre la vegetación menos estrés tendrá la plantan. Sin embargo, también se puede interpretar y concluir que, a mayor desarrollo vegetativo, mejor resultado del estado del cultivo y el agua se podrá observar.
- A pesar de que algunos índices comparativos con lámina de agua tuvieron una correlación significativa o media, la hipótesis se rechaza ya que los datos no cumplen el resultado para alcanzar un resultado aceptable.
- Este estudio nos da paso para seguir una investigación tomando en cuenta más puntos de muestreo, utilizando análisis de agua foliares.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda la toma de más muestras de humedad en campo para tener una mayor población de medición para la correlación de los datos.
- Para la realización de mapas con imágenes satelitales, es recomendable que se realice en épocas secas, ya que en época lluviosa la nubosidad interfiera con las imágenes.
- Estos seguimientos se pueden realizar durante épocas secas o lluviosas, si se cuenta con equipo como drones con cámaras multiespectral, ya que vuelan bajo y no hay interferencia en nubosidad exceptuando la neblina.
- Es recomendable para este tipo de estudio, tomar en cuenta una muestra de las plantas y analizar la cantidad de agua que posee directamente mediante análisis de laboratorio, con esto poder ver la inferencia de la humedad del suelo con respecto a la planta.

Capítulo VI. Bibliografía y Anexos

6.1 Bibliografía

- SAPGIS (1987). “Spatial Analytical Perspective on Geographical Information Systems”. International Journal of Geographical Information Systems.
- Abeurrea, M. (2013). Comparación de índices de vegetación en zona semiárida de Navarra. Trabajo Fin de Carrera. Obtenido de <https://studylib.es/doc/5331491/comparación-de-índices-de-vegetación-en-zona-semiárida-de>
- Acromático. (2018). Agromático. Recuperado el 02 de 08 de 2018, de Satélites Sentinel 2 para teledetección en agricultura: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Fy1x4MPqIH0J:https://www.agromatico.es/sentinel-2-teledeteccion-agricultura/+&cd=3&hl=es&ct=clnk&gl=cr>
- Agro noticias. (2012). Agro noticias. Obtenido de Información Capacidad de campo y Punto de marchitez permanente: <https://agronoticias2012.blogspot.com/2016/08/punto-de-marchitez-permanente-capacidad.html>
- Aguilar, N. (2015). Ficha Técnica del Cultivo de Caña de Azúcar. Ciudad de México. Obtenido de http://nutriciondebovinos.com.ar/MD_upload/nutriciondebovinos_com_ar/Archivos/File/CA%C3%91A_DE_AZ%C3%91ACAR,_FICHA_T%C3%89CNICA.pdf
- Aguirre, K. E. (2012). “Desarrollo de un programa de cómputo para análisis de imágenes de satélite con fines de predicción hidrológica”. San José.
- Alvarado, A. (1970). Estudio edafológico y agrológico de las sabanas de Buenos Aires de Puntarenas. Ing. Agr., Facultad de Agronomía, Universidad de Costa Rica, San José. Obtenido de https://www.mag.go.cr/rev_agr/v29n01_085.pdf
- Alvarado, A., y Forsyth, W. (2005). Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de costa rica. Costa rica.
- Alvarado, A., y W, F. (2005). Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de costa rica. San José. Obtenido de http://www.mag.go.cr/rev_agr/v29n01_085.pdf
- Alvarado, A. y Warren, F. (9 de marzo de 2005). Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. Obtenido de MAG: https://www.mag.go.cr/rev_agr/v29n01_085.pdf
- Angulo, A. (1999). Diagnóstico de campo sobre el efecto del estrés hídrico en las plantaciones de caña de azúcar en cañas, Guanacaste afectadas por la sequía. Dirección de investigación y extensión de la caña de azúcar (Dieca-Laica) 1/, San José.
- Antúñez, A., Felmer, S., S, M. V., Morales, R., Coz, J & F, F. (2017). Propiedades Físico-Hídricas del Suelo en el Cultivo del Maíz Grano. Obtenido de <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR40309.pdf>
- Araya Morales, E. J. (2009). Manual de procesos en fotografías aéreas e Imágenes de satélite. San José.
- Área de Edafología y Química Agrícola Facultad de Ciencias. (13 de abril de 2005). ECA Lección 5 Propiedades físicas. Porosidad. Obtenido de <https://www.eweb.unex.es/eweb/edafo/ECAP/ECAL5PFPorosidad.htm>

- Balbontin, C., Calera, A., Campos, I., González, J., & López, M. (2009). Balance Hídrico y Estrés en la Cubierta Vegetal Utilizando una Secuencia Multitemporal de Imágenes. Caso de Estudio: Cultivo de Trigo en Secano. Calatayud.
- Boca, T., & Rodríguez, G. (2012). INTA. Recuperado el 21 de 07 de 2019, de https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-_mtodos_est__sensores.pdf
- Bo-Cai-Gao. (1996). NDWI A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. Obtenido de http://ceeserver.cce.cornell.edu/wdp2/cee6150/Readings/Gao_1996_RSE_58_257-266_NDWI.pdf
- Casella, A., Barrionuevo, N., Pezzola, A. y Winschel, C. (2018). Pre-Procesamiento De Imágenes Satelitales Del Sensor Sentinel 2a Y 2b Con El Software Snap 6.0. Instituto de Clima y Agua. C.I.R.N. INTA Castelar, Buenos Aires. Recuperado el 15 de mayo de 2020
- Cátedra de Cereales y Oleaginosas Departamento de Producción Vegetal Facultad de Ciencias Agropecuarias Universidad Nacional de Córdoba. (20 de octubre de 2019). Determinación del contenido hídrico del suelo. Obtenido de <https://www.tecnoriegovalley.com.ar/uploads/fca-unc-determinacion-del-contenido-hidrico-del-suelo-2983.pdf>
- Cháves, M. A. (2017). Floración en la Caña de Azúcar. Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar. Recuperado el 06 de agosto de 2018.
- Chuvieco, E. (1995). Fundamentos de Teledetección Espacial. Madrid: RIAL S.A.
- Comisión Nacional de Riego-Centro de Investigación y Transferencia de Riego Agro climatología (CITRA). (2 de noviembre de 2017). Coeficiente de Cultivo. Recuperado el 23 de agosto de 2018, de <https://tecnoagro.com.mx/no.-121/coeficiente-de-cultivo>
- Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. (2015). Ficha técnica del cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.). México. Recuperado el 05 de agosto de 2018, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/141823/Ficha_Tcnica_Ca_a_de_Az_car.pdf
- Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible. (2012). Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible. Obtenido de Junta de Andalucía: http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam/menuitem.04dc44281e5d53cf8ca78ca731525ea0/?vgnextoid=d3e999a84bb42410VgnVCM2000000624e50aRCRD&vgnnextchannel=ef9e767435f93310VgnVCM1000001325e50aRCRD&vgnnextfmt=rediam&lr=lang_es#apartado53e999a84bb42
- Díaz Montejó, L. L.y Portocarrero River, E. T. (2002). Manual de Producción de Caña de Azúcar. Honduras.
- Documentación QGis 2.18. (2020). Lesson: Conversión de Raster a Vectorial¶. Obtenido de Documentación QGis 2.18: https://docs.qgis.org/2.18/es/docs/training_manual/complete_analysis/raster_to_vector.html
- Educación Forestal en Almazcara. (05 de junio de 2017). Educación Forestal en Almazcara. Obtenido de <http://almazcara.forestry.es/2017/06/bandas-satelite-sentinel-2.html>
- Educación Forestal. (5 de junio de 2017). Educación Forestal. Recuperado el 11 de abril de 2020, de <http://almazcara.forestry.es/2017/06/bandas-satelite-sentinel-2.html>
- esa. (23 de junio de 2015). esa-España. Obtenido de https://www.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/La_camara_de_Sentinel-2

- Espinoza, H. (1989). Balance Hídrico del Agua para los Cultivos más importancia en la Cuencas de Río Ciénega. Santa Cruz-Bolivia.
- Flores, J. (2007). Agro cadena de la caña de azúcar para la producción de dulce. Puriscal.
- Flores, L., & Alcalá, J. (2010). Manual de Procedimientos Analíticos Laboratorio de Suelos. México, DF. Obtenido de <http://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf>
- Food and Agriculture Organization. (2018). Coeficiente de Cultivos. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/pdf/009/x0490s/x0490s02.pdf>
- Fragoso, Á., Karen, H. C., Domingo, J., Ochoa, M., Morales, A., & Ana, M. (2010). Práctica de edafología. Densidad real y densidad aparente del suelo. Chiapas. Obtenido de <https://es.slideshare.net/kryzdfagg/densidad-real-y-aparente>
- Geocento-Earth Imagin. (2015). Geocento-Earth Imagin. Recuperado el 07 de agosto de 2018, de <http://geocento.es/galeria-de-satelites-para-buscar-y-adquirir-imagenes/satelite-imagenes-landsat-8/>
- Gestión de Operaciones. (21 de junio de 2015). Gestión de Operaciones Blog. Obtenido de GEO: <https://www.gestiondeoperaciones.net/estadistica/como-se-relaciona-el-coeficiente-de-correlacion-de-pearson-r-y-el-coeficiente-de-determinacion-r-cuadrado-r%C2%B2/>
- gisandbeers. (16 de febrero de 2019). Plugin SCP para descarga de imágenes satélite en QGIS. Obtenido de <http://www.gisandbeers.com/plugin-scp-descarga-imagenes-satelite-en-qgis/>
- Glaría, J., & Kouro, S. (2001). Automatización Industrial: Sensores de Humedad. Recuperado el 02 de agosto de 2018, de <http://ingeborda.com.ar/biblioteca/Biblioteca%20Internet/Articulos%20Tecnicos%20de%20Consulta/Instalaciones%20Electricas%20Industriales/Sensores%20de%20Humedad.pdf>
- Hernández, F. (2018). Asistencia Técnica Agrícola. Obtenido de http://www.agro-tecnologia-tropical.com/densidad_aparente.html
- Huete, A. R. (1988). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI).
- Ibáñez, J. J. (26 de junio de 2006). Madrid Blog. Obtenido de Niveles de Humedad del Suelo y Agua disponible: El Agua en El Suelo 3: <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2006/06/26/33002>
- InfoTerra Servicios de Geo información S.A. (2009). InfoTerra. Recuperado el 07 de agosto de 2018, de AIRBUS defence and space: <http://www.infoterra.es/datos-satelite-spot>
- Kruse, F.A. (2004). Comparison of ATREM, ACORN, and FLAASH atmospheric corrections using low-altitude AVIRIS data of Boulder, CO. Recuperado de http://www.hgimaging.com/PDF/Kruse-JPL2004_ATM_Compare.pdf
- Laboratorio Unidad Pacífico Sur CIESAS. (2010). Sistemas de Información Geográfica. Obtenido de <https://langleruben.wordpress.com/%C2%BFque-es-un-sig/>
- Labrador, M., Évora, J. A., & Arbélo, M. (2012). Satélites de Teledetección para Gestión de Territorios. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias. Recuperado el 02 de agosto de 2018

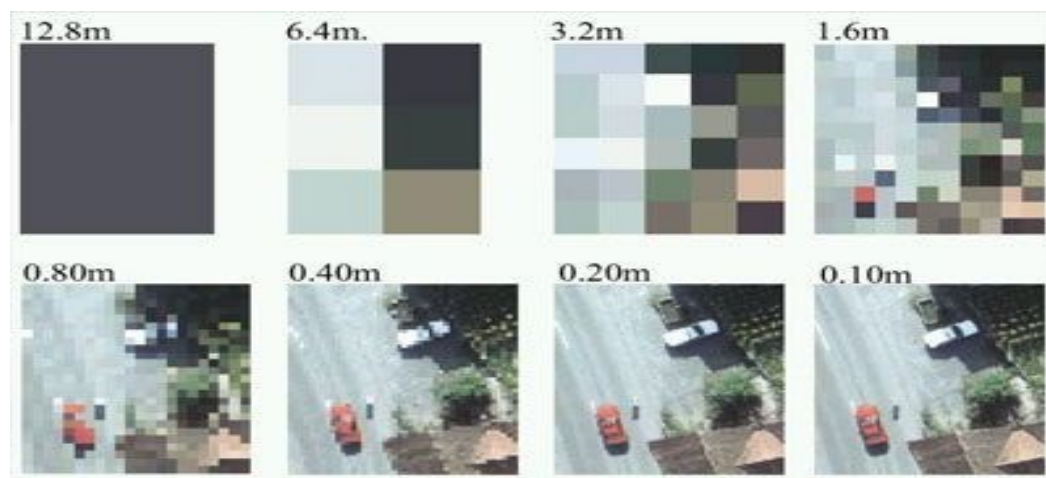
- Leite, M., Baiao, L., Fernández, H. C., Souza, J., Fernández, E., & Terra, N. (2012). Use of digital images for evaluating soil compaction in the culture of beans. Brasil.
- López, A., Martínez, M. R., & Fernández, D. S. (25 de Julio de 2014). Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. Tecnología y ciencias del agua-versión On-line ISSN 2007-2422, vol.6 (No.1). doi: Jiutepec ene./feb. 2015
- Lutz Porras, J. R. (2017). Evaluación del impacto de cambio climático en la producción de caña de azúcar: el caso de Ingenio Atirro en Turrialba, Costa Rica. Universidad de Costa Rica, San José.
- Lutz, J. R. (2017). Evaluación del Impacto del Cambio Climático en la Producción de Caña de Azúcar: El Caso del Ingenio Atirro en Turrialba, Costa Rica. San José.
- Matallanes, R. (2020). Modelo vectorial y raster: ventajas y desventajas. Obtenido de <https://geoinnova.org/blog-territorio/modelo-vectorial-y-modelo-raster/>
- Microsoft office. (2019). Support Microsoft Office. Recuperado el 27 de 07 de 2019, de <https://support.office.com/es-es/article/pearson-funci%C3%B3n-pearson-0c3e30fc-e5af-49c4-808a-3ef66e034c18>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (1991). Aspectos Técnicos sobre Cuarenta y Cinco Cultivos Agrícolas de Costa Rica. San José, San José. Obtenido de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/tec-cana.pdf>
- Moreno, L. P. (2009). Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Agro. colomb., Volumen 27, Número 2, 191.
- NASA Ciencia Beta. (12 de agosto de 2019). La NASA mide el estrés en las plantas durante la sequía costarricense. Obtenido de NASA Ciencia Beta: <https://ciencia.nasa.gov/la-nasa-mide-el-estr%C3%A9s-en-las-plantas-durante-la-sequi%C3%ADa-costarricense>
- NETAFIN.(2019). NETAFIN. Obtenido de Fases del Ciclo del Cultivo: http://www.sugarcane crops.com/s/crop_growth_phases/
- Ordoñez, J. (2011). Balance Hídrico Superficial. Lima: Sociedad Geográfica de Lima.
- Pearson, R., & Miller, R. (1972). División de Planificación de Control de Agua - Tennessee Valley Authority. Publicado por Willow Run Laboratories, Instituto de Investigación Ambiental de Michigan, Ann Arbor, Michigan EE. UU., 1972, p.1355. Michigan.
- Perafán, F. (2009). Azúcar de Caña. Recuperado el 05 de agosto de 2018, de Perafán: <http://www.perafan.com/azucar/ea02cana.html>
- Pérez, L. (05 de junio de 2018). Preparar un mapa para imprimir o exportar en QGIS. Obtenido de <https://acolita.com/preparar-un-mapa-para-imprimir-o-exportar-en-qgis-3/>
- Pontes, A. (2005). Aplicaciones de las tecnologías de la información y de la comunicación en la educación científica. Segunda parte: aspectos metodológicos. Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias, 343.

- Programa Hidrológico Internacional (PHI); UNESCO. (2007). Balance Hídrico Superficial de Costa Rica 1970-2002. Documento Técnico, UNESCO, Montevideo. Recuperado el 13 de junio de 2018, de <http://unesdoc.unesco.org/images/0015/001563/156338s.pdf>
- Ramos, D. (2017). MappingGIS. Recuperado el 13 de junio de 2018, de <https://mappinggis.com/2015/06/ndvi-que-es-y-como-calcularlo-con-saga-desde-qgis/>
- Ramos, D. (2017). MappingGIS. Recuperado el 13 de abril de 2020, de <https://mappinggis.com/2015/06/ndvi-que-es-y-como-calcularlo-con-saga-desde-qgis/>
- Riquelme M.(2019). Web y Empresas. Obtenido de <https://www.webyempresas.com/coeficiente-de-correlacion-de-pearson/>
- Rojas, J., y Sáenz, P. (2018). DENSIDAD APARENTE Comparación de métodos de determinación en Ensayo de rotaciones en siembra directa. Obtenido de https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-_densidad_aparente.pdf
- SACSA. (28 de mayo de 2018). Servicios Agropecuarios de la Costa S.A. de C.V. Obtenido de <http://www.gruposacsa.com.mx/humedad-del-suelo-se-comporta-importancia/>
- Savino, M. A. (2016). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Obtenido de Análisis de la respuesta al estrés hídrico sobre híbridos de caña de azúcar en condiciones controladas: <https://inta.gob.ar/documentos/analisis-de-la-respuesta-al-estres-hidrico-sobre-hibridos-de-cana-de-azucar-en-condiciones-controladas>
- Sentinel Hub by Sinergise. (2018). Sentinel Hub by Sinergise. Obtenido de <https://www.sentinel-hub.com/eopproducts/ndvi-normalized-difference-vegetation-index>
- Serrano, D. (04 de marzo de 2020). CursosSig.com. Obtenido de <https://www.cursosgis.com/como-crear-un-mapa-electoral-en-qgis/>
- SNIA. (2015). Sistema de Información Agropecuaria. Obtenido de http://dlibrary.snia.gub.uy/maproom/Monitoreo_Agroclimatico/INDICES_VEGETACION/NDWI/NDWI_250m/NDWI.html
- SPCI-Caña de Azúcar. (2011). SPCI-Caña de Azúcar-Zonas Productoras-Suelos y Riego. Recuperado el 06 de agosto de 2018, de <http://unefmagronomia-spci-canazucar.blogspot.com/2011/03/zonas-productoras-suelos-riego.html>
- Subirá, C. (2013). Zonificación de parcelas frutícolas a partir de índices de vegetación de imágenes del satélite worldview-2 con fines de agricultura de precisión. Madrid.
- Técnico Agrícola. (2013). Técnico Agrícola. Recuperado el 30 de octubre de 2018, de <http://www.tecnicoagricola.es/la-capacidad-de-campo-de-un-suelo/>
- TRAXCO. (2014). TRAXCO Componente para Riego Pívor. Obtenido de <https://www.traxco.es/blog/tecnologia-del-riego/retencion-de-agua-del-suelo>
- USGS science for a changin world. (2015). Archivo USGS EROS - Sentinel-2. Obtenido de https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-sentinel-2?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects

- Valenzuela, I. (2005). VIX-Que es un satélite. Recuperado el 02 de agosto de 2018, de Explora: <https://www.vix.com/es/users/isabel-valenzuela>
- Vásquez, I. (18 de 12 de 2015). Gestipolis. Obtenido de <https://www.gestipolis.com/tipos-estudio-metodos-investigacion/>
- Vázquez, P. (24 de junio de 2013). Comparación de índices de estrés hídrico, a partir de información captada por el sensor MODIS, en la región pampeana argentina. Revista de la Universidad de Granada, 52(1). Recuperado el 02 de agosto de 2018, de <http://revistaseug.ugr.es/index.php/cuadgeo/article/view/925/1099>
- Wheather Spark. (2019). Wheather Spark. Obtenido de El clima típico de cualquier lugar del mundo: <https://es.weatherspark.com/y/14910/Clima-promedio-en-Ca%C3%B1as-Costa-Rica-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- WILDING L.P., P. R. (1988). Vertisols: their distribution, properties, classification and management. Soil Management and Support Services. Technical Monograph No. 18. Texas A&M. Texas-USA: University Printing Center.

6.2 Anexo

Anexo 1. Resolución espacial de una imagen multispectral



Anexo 2. Fechas de evaluaciones de campo con sensor de humedad.

Fechas de evaluación	Cantidad	Modo
19-ene-19	1	Sensor de humedad
18-feb-19	1	Sensor de humedad
20-mar-19	2	Sensor de humedad
04-abr-19	1	Fallida
09-abr-19	1	Sensor de humedad
24-abril-19	1	Sensor de humedad

Anexo 3. Promedio de densidades aparentes a 20 y 40 cm.

Lote	Profundidad suelo	% Humedad gravimétrica	Densidad Aparente (gr/cm³)	Densidad Real (gr/cm³)	% Porosidad
San Carlos	20 CM	28,18	0,84	2,51	67
	20 CM	29,23	0,84	2,34	64
	20 CM	23,76	0,84	2,24	63
	20 CM	19,9	1,00	2,45	59
	40 CM	30,22	0,93	2,21	58
	40 CM	30,25	0,98	2,36	58
	40 CM	21,45	0,79	1,87	58
I	40 CM	16,77	1,05	2,35	55
	20 CM	28,86	0,9	2,14	58
	20 CM	28,49	0,83	2,39	65
	20 CM	27,21	0,95	2,23	57
	20 CM	26,77	0,62	2,23	72
	40 CM	30,09	1,01	2,62	61
	40 CM	35,16	0,78	2,42	68
	40 CM	32,75	0,91	2,34	61
	40 CM	32,45	0,8	2,6	69
Hortigal L	20 CM	31,23	0,99	2,46	60
	20 CM	30,5	0,92	2,65	65
	20 CM	28,69	1,07	2,36	55
	40 CM	24,16	1,05	2,13	51
	40 CM	28,22	1,05	2,46	57
	40 CM	32,68	1,01	2,65	62

Anexo 4. Datos de peso suelo humedad tomados en laboratorio

PESO SUELO HUMEDO					
Lote	Punto	Nivel suelo	Peso cilindro (gr)	Peso cilindro + suelo húmedo (gr)	Peso muestra (gr)
San Carlos- I	1	20 CM	153,03	296,24	143,21
	2	20 CM	153,03	299,78	146,75
	3	20 CM	153,03	289,12	136,09
	4	20 CM	153,03	306,25	153,22
	1	40 CM	153,03	317,12	164,09
	2	40 CM	153,03	326,15	173,12
	3	40 CM	153,03	277,37	124,34
	4	40 CM	153,03	308,87	155,84
	1	20 CM	153,03	309,49	156,46
	2	20 CM	153,03	295,54	142,51
	3	20 CM	153,03	313,88	160,85
	4	20 CM	153,03	257,78	104,75
	1	40 CM	153,03	331,47	178,44
	2	40 CM	153,03	302,11	149,08
	3	40 CM	153,03	319,09	166,06
	4	40 CM	153,03	298,19	145,16
	1	20 CM	153,03	330,96	177,93
	2	20 CM	153,03	316,25	163,22
Hortigal-L	3	20 CM	153,03	337,97	184,94
	1	40 CM	153,03	323,71	170,68
	2	40 CM	153,03	333,60	180,57
	3	40 CM	153,03	338,06	185,03

Anexo 5. Datos de peso seco procesados en Laboratorio

PESO SUELO SECO					
Lote	Punto	Nivel suelo	peso cilindro (gr)	Peso cilindro + suelo seco (gr)	Peso muestra (gr)
San Carlos - I	1	20 CM	153,03	255,88	102,85
	2	20 CM	153,03	256,88	103,85
	3	20 CM	153,03	256,78	103,75
	4	20 CM	153,03	275,76	122,73
	1	40 CM	153,03	267,54	114,51
	2	40 CM	153,03	273,78	120,75
	3	40 CM	153,03	250,7	97,67
	4	40 CM	153,03	282,73	129,7
	1	20 CM	153,03	264,33	111,3
	2	20 CM	153,03	254,94	101,91
	3	20 CM	153,03	270,12	117,09
	4	20 CM	153,03	229,74	76,71
	1	40 CM	153,03	277,77	124,74
	2	40 CM	153,03	249,69	96,66
	3	40 CM	153,03	264,71	111,68
	4	40 CM	153,03	251,09	98,06
Hortigal -L					
	1	20 CM	153,03	275,4	122,37
	2	20 CM	153,03	266,47	113,44
	3	20 CM	153,03	284,91	131,88
	1	40 CM	153,03	282,48	129,45
	2	40 CM	153,03	282,65	129,62
	3	40 CM	153,03	277,59	124,56

Anexo 7. Resultados de densidad aparente de las muestras tomadas en campo

Lote	#Muestra	Distancia	Peso Seco (gr)	Peso húmedo(gr)	Densidad Aparente
		MUESTRA	PS	PW	Da
	1	20 CM	102,85	143,21	0,84
	2	20 CM	103,85	146,75	0,84
	3	20 CM	103,75	136,09	0,84
	4	20 CM	122,73	153,22	1,00
	1	40 CM	114,51	164,09	0,93
	2	40 CM	120,75	173,12	0,98
	3	40 CM	97,67	124,34	0,79
	4	40 CM	129,7	155,84	1,05
San Carlos-I	1	20 CM	111,3	156,46	0,90
	2	20 CM	101,91	142,51	0,83
	3	20 CM	117,09	160,85	0,95
	4	20 CM	76,71	104,75	0,62
	1	40 CM	124,74	178,44	1,01
	2	40 CM	96,66	149,08	0,78
	3	40 CM	111,68	166,06	0,91
	4	40 CM	98,06	145,16	0,80
Hortigal-L	1	20 CM	122,37	177,93	0,99
	2	20 CM	113,44	163,22	0,92
	3	20 CM	131,88	184,94	1,07
	1	40 CM	129,45	170,68	1,05
	2	40 CM	129,62	180,57	1,05
	3	40 CM	124,56	185,03	1,01

Anexo 8. Datos de humedad (láminas) de agua de los lotes.

Lote	Fecha Muestra	Puntos	20cm	40cm	Prom de humedad	Humedad gravimétrica	Lámina(1) mm	Lámina(2) mm	Suma de Láminas (mm)
SC I	19/01/2019	1	32.0	30.7	31.4	35.52	64.00	61.40	125.40
SC I	19/01/2019	2	16.5	29.0	22.8	24.95	33.00	58.00	91.00
SC I	19/01/2019	3	19.0	33.3	26.2	31.98	38.00	66.60	104.60
SC I	19/01/2019	4	12.0	16.3	14.2	13.81	24.00	32.60	56.60
SC I	19/01/2019	1	31.4	36.5	34.0	35.43	62.80	73.00	135.80
SC I	19/01/2019	2	32.1	38.1	35.1	43.54	64.20	76.20	140.40
SC I	19/01/2019	3	29.7	34.3	32.0	34.45	59.40	68.60	128.00
SC I	19/01/2019	4	25.7	36.5	31.1	43.83	51.40	73.00	124.40
SC I	18/02/2019	1	41.0	39.5	40.3	45.61	82.00	79.00	161.00
SC I	18/02/2019	2	39.0	36.0	37.5	41.12	78.00	72.00	150.00
SC I	18/02/2019	3	41.3	40.7	41.0	50.14	82.60	81.40	164.00
SC I	18/02/2019	4	42.9	42.7	42.8	41.76	85.80	85.40	171.20
SC I	18/02/2019	1	40.4	41.4	40.9	42.68	80.80	82.80	163.60
SC I	18/02/2019	2	41.7	41.0	41.4	51.29	83.40	82.00	165.40
SC I	18/02/2019	3	41.9	41.0	41.5	44.63	83.80	82.00	165.80
SC I	18/02/2019	4	41.0	38.5	39.8	56.02	82.00	77.00	159.00
SC I	20/03/2019	1	31.7	33.6	32.7	37.00	63.40	67.20	130.60
SC I	20/03/2019	2	24.3	33.6	28.9	31.72	48.60	67.10	115.70
SC I	20/03/2019	3	24.4	33.8	29.1	35.55	48.70	67.60	116.30
SC I	20/03/2019	4	18.9	26.4	22.6	22.08	37.70	52.80	90.50
SC I	20/03/2019	1	40.7	40.5	40.6	42.34	81.40	80.90	162.30
SC I	20/03/2019	2	40.4	38.5	39.4	48.90	80.70	77.00	157.70
SC I	20/03/2019	3	41.6	40.9	41.2	44.38	83.20	81.70	164.90
SC I	20/03/2019	4	42.0	40.6	41.3	58.17	83.90	81.20	165.10
SC I	09/04/2019	1	21.9	17.7	19.8	22.44	43.80	35.40	79.20
SC I	09/04/2019	2	27.4	31.5	29.5	32.30	54.80	63.00	117.80
SC I	09/04/2019	3	18.4	21.1	19.8	24.15	36.80	42.20	79.00
SC I	09/04/2019	4	18.9	25.2	22.1	21.51	37.80	50.40	88.20
SC I	09/04/2019	1	24.0	28.6	26.3	27.44	48.00	57.20	105.20
SC I	09/04/2019	2	29.2	33.1	31.2	38.64	58.40	66.20	124.60
SC I	09/04/2019	3	27.4	22.0	24.7	26.59	54.80	44.00	98.80
SC I	09/04/2019	4	23.6	28.0	25.8	36.36	47.20	56.00	103.20
H L	20/03/2019	1	39.4	38.3	38.9	38.00	78.80	76.60	155.40
H L	20/03/2019	2	32.3	40.1	36.2	36.68	64.60	80.20	144.80
H L	20/03/2019	3	38.3	35.2	36.8	35.30	76.60	70.40	147.00

H L	20/03/2019	4	28.6	33.6	31.1	29.87	57.20	67.20	124.40
H L	09/04/2019	1	26.3	33.6	30.0	29.29	52.60	67.20	119.80
H L	09/04/2019	2	28.0	38.1	33.1	33.49	56.00	76.20	132.20
H L	09/04/2019	3	25.1	31.0	28.1	26.94	50.20	62.00	112.20
H L	09/04/2019	4	29.4	33.4	31.4	30.16	58.80	66.80	125.60
H L	24/04/2019	1	24.4	32.8	28.6	27.97	48.80	65.60	114.40
H L	24/04/2019	2	29.7	38.8	34.3	34.71	59.40	77.60	137.00
H L	24/04/2019	3	23.1	24.6	23.9	22.91	46.20	49.20	95.40
H L	24/04/2019	4	29.2	33.1	31.2	29.92	58.40	66.20	124.60

Anexo 9. Tabla con los puntos de los datos de NDVI e NDWI en promedios.

Lote	Fecha Cosecha	Fecha Muestra	Puntos	NDVI	NDWI
SC I	16/12/2019	19/01/2019	1	0.28807188	- 0.13804553
SC I	16/12/2019	19/01/2019	2	0.29815560	- 0.10960960
SC I	16/12/2019	19/01/2019	3	0.36140694	- 0.03186161
SC I	16/12/2019	19/01/2019	4	0.34887439	- 0.02886787
SC I	16/12/2019	19/01/2019	1	0.29997634	- 0.16110250
SC I	16/12/2019	19/01/2019	2	0.25500797	- 0.12373490
SC I	16/12/2019	19/01/2019	3	0.29318332	- 0.07737613
SC I	16/12/2019	19/01/2019	4	0.31508807	- 0.08789515
SC I	16/12/2019	18/02/2019	1	0.49775853	0.08675809
SC I	16/12/2019	18/02/2019	2	0.51453433	0.09381530
SC I	16/12/2019	18/02/2019	3	0.57432025	0.17278072
SC I	16/12/2019	18/02/2019	4	0.57055694	0.17329100
SC I	16/12/2019	18/02/2019	1	0.53931231	0.09024542
SC I	16/12/2019	18/02/2019	2	0.50229323	0.07140170
SC I	16/12/2019	18/02/2019	3	0.54398661	0.14581810
SC I	16/12/2019	18/02/2019	4	0.57842648	0.16704408
SC I	16/12/2019	20/03/2019	1	0.56511344	0.16224388
SC I	16/12/2019	20/03/2019	2	0.54382689	0.14405860
SC I	16/12/2019	20/03/2019	3	0.70404419	0.29262519

SC I	16/12/2019	20/03/2019	4	0.69945861	0.28911355
SC I	16/12/2019	20/03/2019	1	0.56248859	0.14535153
SC I	16/12/2019	20/03/2019	2	0.56141417	0.14133810
SC I	16/12/2019	20/03/2019	3	0.58168742	0.18380906
SC I	16/12/2019	20/03/2019	4	0.59952531	0.19436428
SC I	16/12/2019	09/04/2019	1	0.39893016	0.20548704
SC I	16/12/2019	09/04/2019	2	0.41333863	0.21699840
SC I	16/12/2019	09/04/2019	3	0.43889356	0.24782594
SC I	16/12/2019	09/04/2019	4	0.44394755	0.25217448
SC I	16/12/2019	09/04/2019	1	0.41333459	0.22250490
SC I	16/12/2019	09/04/2019	2	0.40824677	0.22097881
SC I	16/12/2019	09/04/2019	3	0.42054690	0.24176955
SC I	16/12/2019	09/04/2019	4	0.42395796	0.24155823
H L	19/02/2019	20/03/2019	1	0.16538917	- 0.14921073
H L	19/02/2019	20/03/2019	2	0.18787273	- 0.17547831
H L	19/02/2019	20/03/2019	3	0.18760558	- 0.19662774
H L	19/02/2019	20/03/2019	4	0.18711232	- 0.17960833
H L	19/02/2019	09/04/2019	1	0.20955553	0.01877562
H L	19/02/2019	09/04/2019	2	0.20921960	0.02032930
H L	19/02/2019	09/04/2019	3	0.19458639	0.00560400
H L	19/02/2019	09/04/2019	4	0.20783823	0.01146094
H L	19/02/2019	24/04/2019	1	0.35177627	- 0.04967410
H L	19/02/2019	24/04/2019	2	0.34612927	- 0.08098370
H L	19/02/2019	24/04/2019	3	0.37459887	- 0.06188400
H L	19/02/2019	24/04/2019	4	0.36711061	- 0.05312739

Anexo10. Humedades volumétricas tomadas en campo, lote San Carlos I en Ingenio Taboga

S.A

Lote	Muestreo	Promedio de humedades Volumétrica% tomadas en campo con sensor
San Carlos -I	1	31.35
	1	22.75
	1	26.15
	1	14.15
	1	33.95
	1	35.10
	1	32.00
	1	31.10
	2	40.25
	2	37.50
	2	41.00
	2	42.80
	2	40.90
	2	41.35
	2	41.45
	2	39.75
	3	32.65
	3	28.93
	3	29.08
	3	22.63
	3	40.58
	3	39.43
	3	41.23
	3	41.28
	4	19.80
	4	29.45
	4	19.75
	4	22.05
	4	26.30
	4	31.15
	4	24.70
	4	25.80

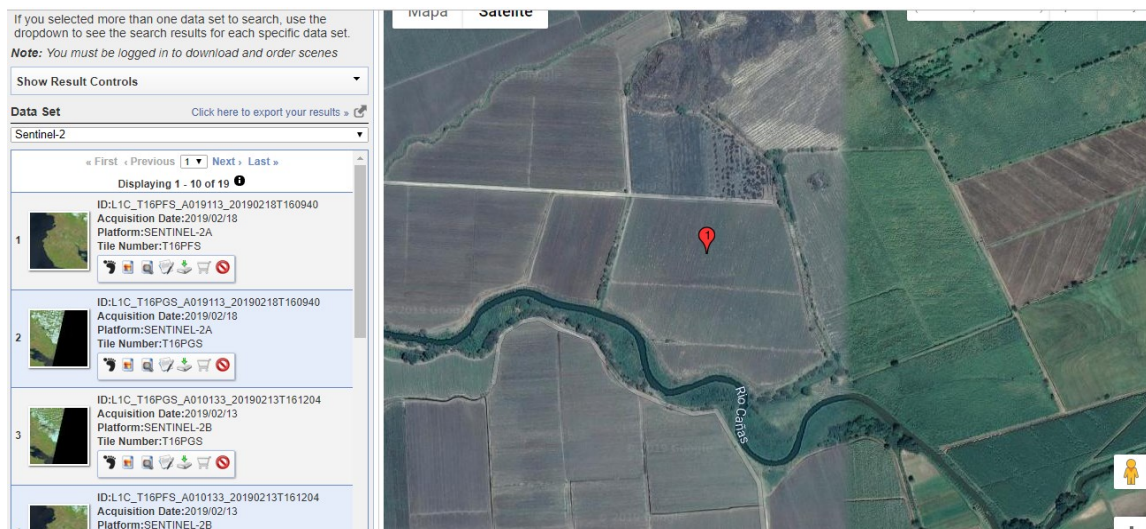
Anexo 11. Humedades volumétricas tomadas en campo, Lote Hortigal L en Ingenio Taboga S.A.

Lote	Muestra	Promedio Humedades Volumétricas %
Hortigal-L	1	38.85
	1	36.20
	1	36.75
	1	31.10
	2	29.95
	2	33.05
	2	28.05
	2	31.40
	3	28.60
	3	34.25
	3	23.85
	3	31.15

Anexo 12. Búsqueda y colocación de ubicación de los lotes a evaluar

The screenshot displays the USGS EarthExplorer website interface. At the top, the USGS logo and tagline "science for a changing world" are visible. Below the header, the "EarthExplorer - Home" section includes a navigation bar with tabs for "Search Criteria", "Data Sets", "Additional Criteria", and "Results". The "Results" tab is active, showing "4. Search Results". A note indicates that users must be logged in to download and order scenes. The "Data Set" section shows "Sentinel-2" as the selected data set. The "Search Criteria Summary" section is visible, showing a map view of the search area. The map displays a coastal region with a red pin indicating the location of the lots to be evaluated. The search results list includes details such as ID, acquisition date, platform, and tile number.

Anexo 13. Descarga de imágenes satelitales de Sentinel 2A y B.



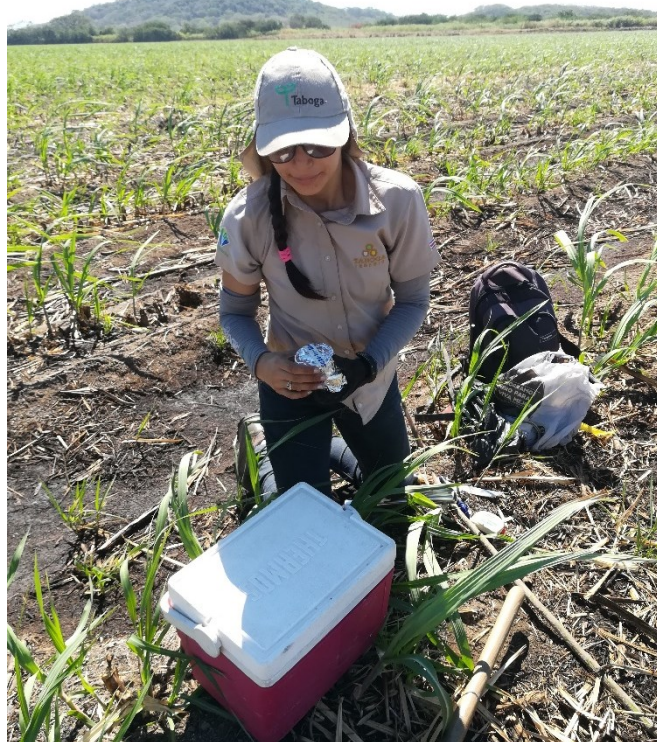
Anexo 14. Colocación de estacas en los puntos de evaluación de suelo y humedad



Anexo 15. Envoltura de muestras de suelo para procesarlas en el Laboratorio.



Anexo 16. Almacenamiento de las muestras de suelo.



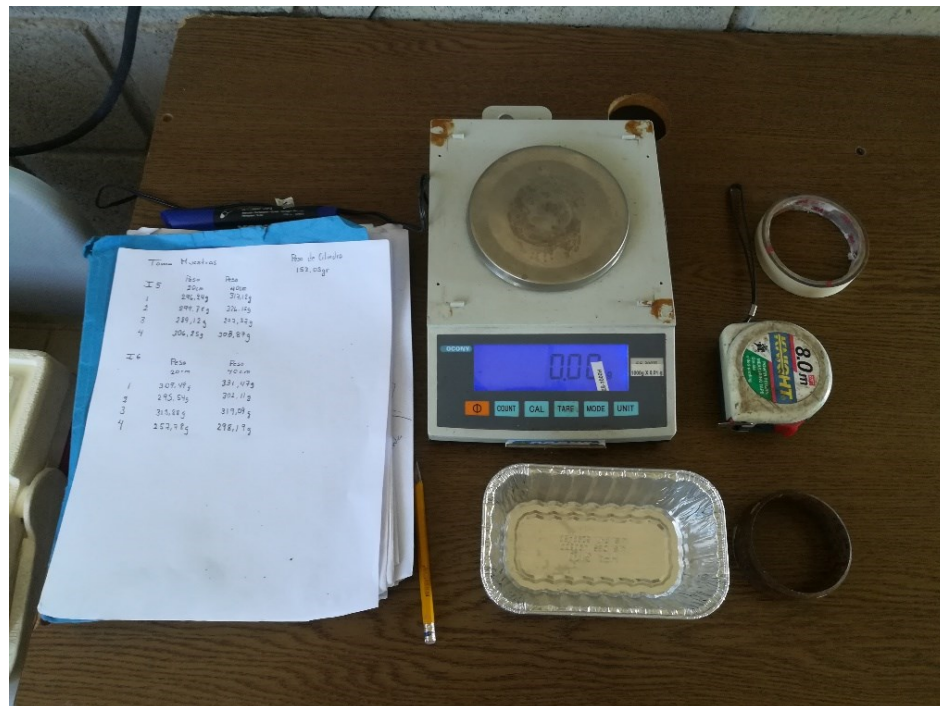
Anexo 16. Herramientas para la toma de humedad en campo.



Anexo 17. Profundidad de la toma de muestras de suelo y de humedad.



Anexo 18. Herramientas para la toma de peso de suelo húmedo y seco en el laboratorio.



Anexo 19. Muestras de suelo secas, listas para toma de peso.



Anexo 20. Muestras de suelo húmedas listas para ser secadas al horno a 110°C.



Anexo 21. Muestras de suelo seco al horno por 48 horas.



Anexo 22. Proceso de obtención de la densidad real.



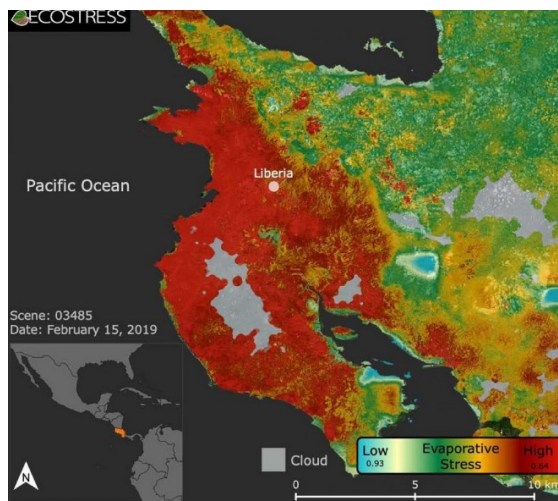
Anexo 23. Suelo seco muy fino para ser medido para obtención de la densidad real.



Anexo 24. Medición del suelo y agua para obtener la densidad real.



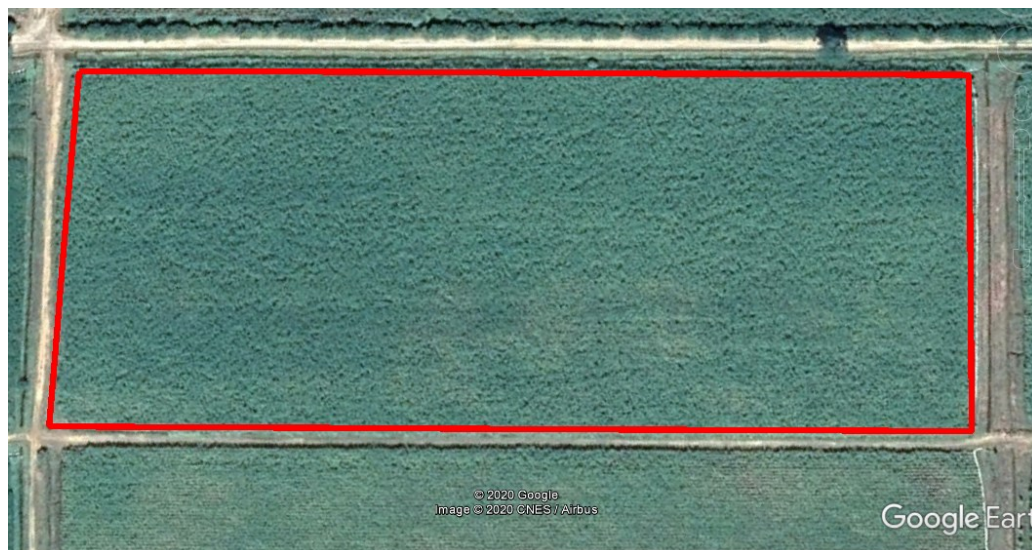
Anexo25. Imagen de la misión ECOSTRESS registra el estrés de las plantas en la región de Guanacaste en Costa Rica (en rojo en el mapa) pocos meses después del inicio de una sequía centroamericana importante. El color rojo indica estrés alto, el amarillo estrés moderado y los verdes/azules, bajo estrés. El gris claro representa nubosidad. NASA/JPL-Caltech 2019.



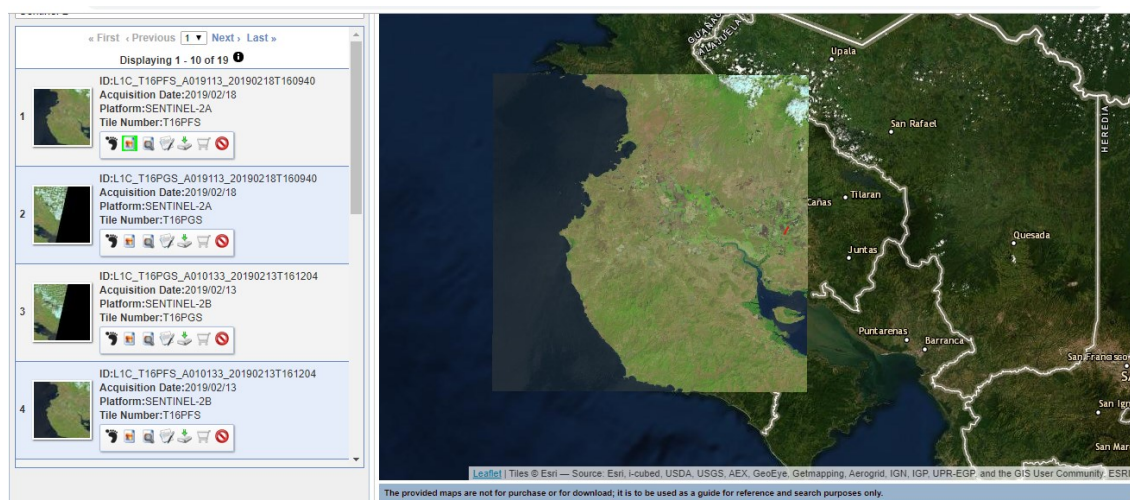
Anexo 26. Lotes donde se realizó la investigación San Carlos



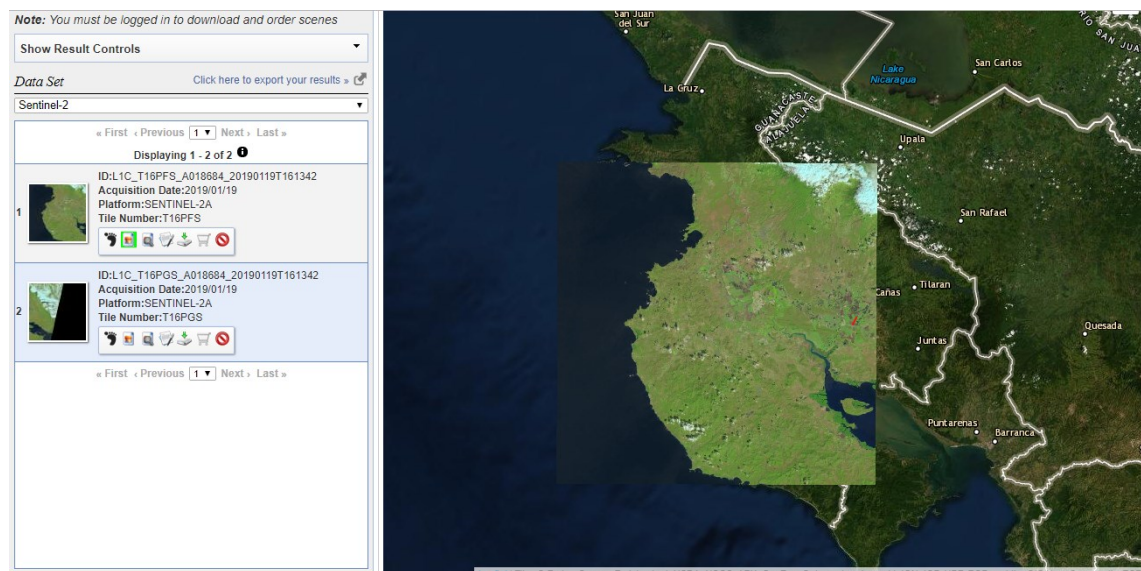
Anexo 27. Lotes donde se realizó la investigación San Hortigal



Anexo 28. Imagen satelital del Sentinel 2 en área de estudio en la fecha del 18 de febrero del 2019.



Anexo 29. Imagen satelital del Sentinel 2 en área de estudio en la fecha del 19 de enero del 2019.



Anexo 30. Lote San Carlos en los primeros días de evaluación.



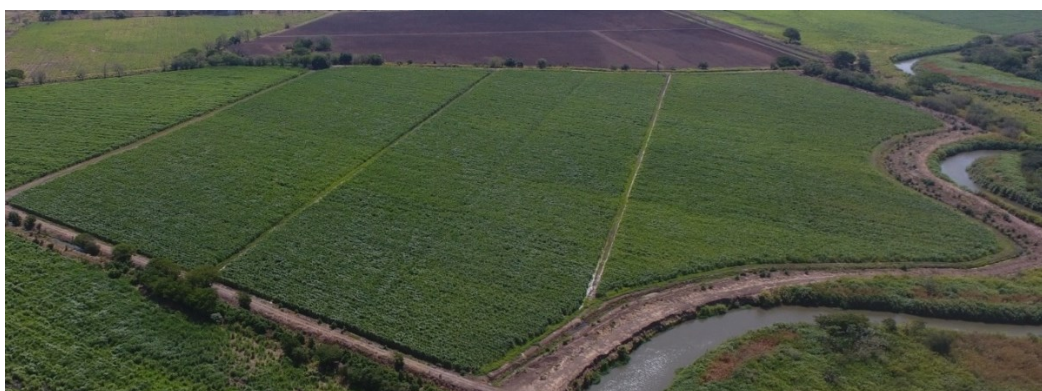
Anexo 31. Lote San Carlos en los primeros días de colocación de estacas.



Anexo 32. Lote Hortigal en los primeros días de colocación de estacas.



Anexo 33. Imágenes tomadas con dron en el desarrollo del cultivo fecha 30-abril-2019.



Anexo 34. Imagen tomada con dron en el desarrollo del cultivo San Carlos en el cuarto mes de evaluación 30-abril-2019.



Anexo 35. Imagen tomada con dron en el desarrollo del cultivo Hortigal en el tercer mes de evaluación 24-abril-2019.



Anexo 36. Imagen tomada con dron en el desarrollo del cultivo Hortigal en el tercer mes de evaluación 24-abril-2019.



Anexo 37. Datos de análisis de suelos

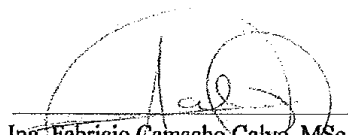
		CENTRO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS CIUDAD DE LA INVESTIGACIÓN, UCR LABORATORIO DE SUELOS Y FOLIARES																											
X	Y	seccion	id_lab	prof	pH	CE	MO	C	N	C/N	P	Ca	Mg	K	acidez	CICE	SA	Fe	Cu	Mn	Zn	S	A	L	Ar	Text	Ca/Mg	Ca+Mg/K	B
-85,1477028	10,3734207	HORTIGAL L	627	30	6,5	0,3	2,288	1,6	0,13	12,31	6	28	19	1,5	0,13	49	0,3	33	17	21	3	0	25	8	67	ARCILLOSO	1,51305274	32,5310345	
-85,1461215	10,3734116	HORTIGAL L	628	30	6,5	0,2	2,4596	1,72	0,14	12,29	6	29	18	1,1	0,13	48	0,3	31	17	19	3	0	32	8	60	ARCILLOSO	1,58898072	42,7181818	
-85,1461139	10,3747074	HORTIGAL L	636	30	6,8	0,2	1,6874	1,18	0,09	13,11	14	32	19	1,1	0,1	51	0,2	27	16	12	4	0	22	11	67	ARCILLOSO	1,67944622	47,0280374	
-85,1445324	10,3747228	HORTIGAL L	637	30	6,4	0,2	1,8876	1,32	0,09	14,67	10	33	19	0,7	0,13	53	0,2	27	17	21	5	0	25	8	67	ARCILLOSO	1,7549176	72,9859155	
-85,1560215	10,3504795	San Carlos	S-17-00885	30	7	0,2	2,4024	1,68	0,15	11,20	7	24	9,8	0,1	0,09	34	0,3	35	12	8	2	48	38	24	38	RANCO ARCILLOS	2,40996948	257,846154	0,7
-85,1579114	10,3519276	San Carlos	S-17-00823	30	6,1	0,2	3,6036	2,52	0,23	10,96	11	24	9,9	0,5	0,12	34	0,4	88	20	18	3	49	13	37	50	ARCILLOSO	2,36921529	71,2553192	0,62
-85,1559583	10,3519655	San Carlos	S-17-00824	30	7	0,2	3,1746	2,22	0,19	11,68	6	25	12	0,3	0,11	37	0,3	41	14	9	2	54	23	32	45	ARCILLOSO	2,18347826	130,75	0,67
-85,1589634	10,3534748	San Carlos	S-17-00829	30	6,4	0,2	2,9029	2,03	0,19	10,68	15	24	11	1,4	0,13	36	0,4	##	18	16	3	49	23	27	50	ARCILLOSO	2,16073059	24,0347222	0,66
-85,157309	10,3532691	San Carlos	S-17-00830	30	7,4	0,3	2,9029	2,03	0,17	11,94	13	26	12	0,6	0,08	39	0,2	40	14	8	2	60	30	22	48	ARCILLOSO	2,20469799	60,6349206	0,87
-85,1553812	10,353209	San Carlos	S-17-00831	30	6,6	0,1	2,7599	1,93	0,17	11,35	9	22	11	0,8	0,1	34	0,3	52	11	12	3	43	35	22	43	ARCILLOSO	2,03257919	44,68	0,48
-85,158882	10,3546966	San Carlos	S-17-00835	30	6,9	0,2	2,86	2	0,18	11,11	14	26	12	1	0,12	39	0,3	58	14	7	2	54	23	29	48	ARCILLOSO	2,14789916	38,6185567	0,65
-85,1573007	10,3546876	San Carlos	S-17-00836	30	7,8	0,3	2,3166	1,62	0,15	10,80	15	28	12	0,7	0,1	40	0,2	39	17	6	1	64	25	27	48	ARCILLOSO	2,37094017	55,5492958	1,17
-85,155721	10,3544087	San Carlos	S-17-00837	30	7	0,2	2,1593	1,51	0,14	10,79	13	16	8,2	1,5	0,11	26	0,4	52	7	16	3	37	50	20	30	CO ARCILLO ARE	1,93909866	15,6688312	0,5

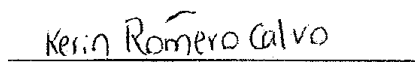
Fuente: El Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica (2017)

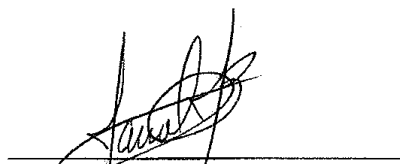
Fuente: El Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica (2017)

MIEMBROS DE TRIBUNAL EVALUADOR

Este trabajo Final de Graduación fue aceptado por el Tribunal de la carrera de Ingeniería Agronómica con énfasis en Riego y Drenaje de la Universidad Técnica Nacional, sede Guanacaste, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciada.



 Ing. Fabricio Camacho Calvo, MSc.
 Profesor Tutor Interno


 Ing. Kerin Romero Calvo, MSc.
 Profesor Lector


 Ing. Jairol Jara Blanco, MSc.
 Profesor Lector

MARIA DE LOS ANGELES ARIAS ALFARO (FIRMA)
 Firmado digitalmente por MARIA DE LOS ANGELES ARIAS ALFARO (FIRMA)
 Fecha: 2020.06.22 15:12:56 -06'00'

Ing. María de los Ángeles Arias Alfaro, MSc.
 Presidente del Tribunal


 Maricruz Segura Herrera
 Sustentante

ANEXO III

**CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA USO Y MANEJO DE LOS TRABAJOS
FINALES DE GRADUACIÓN UNIVERSIDAD TÉCNICA NACIONAL**

(Trabajo Individual)

Cañas, 23-06-2020

Señores Vicerrectoría de Investigación Sistema Integrado de Bibliotecas y Recursos Digitales

Estimados señores: Yo Maricruz Segura Herrera portador (a) de la cédula de identidad número 5-0390-0274. En mi calidad de autor (a) del trabajo de graduación titulado: **“Correlación entre la humedad del suelo, los índices NDVI y NDWI, como indicativo del estrés hídrico en el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en la variedad BC 001220, Ingenio Taboga”**.

El cual se presenta bajo la modalidad de:

_____ Proyecto de Graduación

___x___ Tesis de Graduación

Presentado en la fecha 8/06/2020, autorizo a la Universidad Técnica Nacional, sede Guanacaste, recinto Corobicí, para que mi trabajo pueda ser manejado de la siguiente manera:

Autorizo	SI	No
Conservación de ejemplares para préstamo y consulta física en biblioteca	x	
Inclusión en el catálogo digital del SIBIREDI (Cita catalográfica)	x	
Comunicación y divulgación a través del Repositorio Institucional	x	
Resumen (Describe en forma breve el contenido del documento)	x	
Consulta electrónica con texto protegido	x	
Descarga electrónica del documento en texto completo protegido	x	

Inclusión en bases de datos y sitios web que se encuentren en convenio con la Universidad Técnica Nacional contando con las mismas condiciones y limitaciones aquí establecidas.	x	
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---	--

Por otra parte, declaro que el trabajo que aquí presento es de plena autoría, es un esfuerzo realizado de forma personal, académica e intelectual con plenos elementos de originalidad y creatividad. Garantizó que no contiene citas, ni transcripciones de forma indebida que puedan devenir en plagio, pues se ha utilizado la normativa vigente de la American Psychological Association (APA). Las citas y transcripciones utilizadas se realizan en el marco de respeto a las obras de terceros. La responsabilidad directa en el diseño y presentación son de competencia exclusiva, por tanto, eximo de toda responsabilidad a la Universidad Técnica Nacional. Consciente de que las autorizaciones no reprimen mis derechos patrimoniales como autor del trabajo. Confío en la que Universidad Técnica Nacional respete y haga respetar mis derechos de propiedad intelectual.

Firma del estudiante: 

Cédula: 5-0390-0274

Día: 19-06-2020