

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

**Escuela de Posgrado**

**DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**USO INDISCRIMINADO DE LA TIERRA CON FINES  
AGRÍCOLAS EN UN ACUÍFERO SOBREPLOTADO  
EN LA CABECERA DEL DESIERTO DE ATACAMA  
Y SU INFLUENCIA EN EL CAMBIO CLIMÁTICO**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**M.Sc. ESTANISLAO ALEJANDRO MAQUERA CALLO**

**Para optar el Grado Académico de:**

**DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**TACNA – PERÚ**

**2024**

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN****ESCUELA DE POSGRADO****DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES****USO INDISCRIMINADO DE LA TIERRA CON FINES  
AGRÍCOLAS EN UN ACUÍFERO SOBREEXPLOTADO  
EN LA CABECERA DEL DESIERTO DE ATACAMA  
Y SU INFLUENCIA EN EL CAMBIO CLIMÁTICO**


Tesis sustentada y aprobada el 26 de febrero del 2024; estando el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE

  
: .....

Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez

SECRETARIO

  
: .....

Dr. Martín Eloy Casilla García

MIEMBRO

  
: .....

Ph.D. Edwin Martín Pino Vargas

ASESOR

  
: .....

Ph.D. Edwin Martín Pino Vargas

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GORHMANN

ESCUELA DE POSGRADO

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

**CERTIFICADO DE SIMILITUD**

Tesis Doctoral

“USO INDISCRIMINADO DE LA TIERRA CON FINES AGRÍCOLAS EN UN ACUÍFERO SOBREPLOTADO EN LA CABECERA DEL DESIERTO DE ATACAMA Y SU INFLUENCIA EN EL CAMBIO CLIMÁTICO”, presentada por el señor M.Sc. Estanislao Alejandro Maquera Callo, para optar el Grado Académico de DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES de la Escuela de Postgrado de la UNJBG

NIVEL DE SIMILITUD (TURNITIN) : 10 %

CONCLUSIÓN: Similitud permitida

Tacna, 27 de octubre de 2023

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'E. M. Pino', is written over a horizontal line.

Ph. D. Ing. Edwin Martin Pino Vargas  
DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN  
FIAG

## **DEDICATORIA**

*A Dios creador de la vida por permitirme seguir superándome y cumplir este sueño*

*A la familia, por su comprensión en este sueño hecho realidad.*

*A mis amigos por su apoyo incondicional en esta etapa de mi vida, y que conllevaron a que pase momentos inolvidables que forman parte de un recuerdo por siempre.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi agradecimiento especial a todas las personas que generosamente dedicaron su tiempo y esfuerzo a este proyecto, en particular a mi alma mater, la UNJBG, por brindarme la oportunidad de alcanzar esta meta.

A la Universidad Nacional de Jorge Basadre Grohmann, a la escuela de posgrado, unidad de posgrado por las facilidades para la realización de los estudios doctorales en Ciencias Ambientales.

A mi asesor, el Ph.D Edwin Pino Vargas por brindarme su apoyo y confianza durante el desarrollo del presente trabajo de investigación y por sus consejos valiosos que motivaron la culminación del informe.

Al Grupo de investigación del agua H<sub>2</sub>O – UNJBG, por su apoyo en el procesamiento de la información.

A cada uno de mis docentes del doctorado en Ciencias Ambientales, que son fuente de inspiración para seguir adquiriendo conocimientos en las diferentes ramas del ambiente.

## ÍNDICE GENERAL

Pág.

<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>v</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xiv</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xv</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACION... 4</b>	
<b>1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>4</b>
1.1.1. Identificación del problema.....	4
<b>1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....</b>	<b>5</b>
1.2.1 El problema principal.....	5
1.2.1 Problemas secundarios .....	5
<b>1.3 JUSTIFICACIÓN EN IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>5</b>
1.3.1 Justificación social.....	5
1.3.2 Justificación académica .....	5
1.3.3 Justificación técnica-ambiental.....	5
1.3.4 Importancia de la investigación .....	5
<b>1.4 OBJETIVOS .....</b>	<b>6</b>
1.4.1 Objetivo general .....	6
1.4.2 Objetivos específicos .....	6
<b>1.5 HIPÓTESIS .....</b>	<b>6</b>
1.5.1 Hipótesis general .....	6
1.5.2 Hipótesis específicas.....	6
<b>1.6 VARIABLES .....</b>	<b>6</b>
1.6.1 Identificación de las variables .....	6
1.6.2 Caracterización de las variables .....	7
1.6.3 Operacionalización de las variables.....	7
<b>1.7 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>8</b>

<b>CAPÍTULO II: MARCO TEORICO .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1 ANTECEDENTES DEL ESTUDIO.....</b>	<b>9</b>
2.1.1 Antecedentes internacionales .....	9
2.1.2 Antecedentes nacionales .....	11
2.1.3 Antecedentes regional o local .....	12
<b>2.2 BASES TEÓRICAS .....</b>	<b>12</b>
2.2.1 Cambio de uso de suelo .....	12
2.2.2 Variabilidad climática .....	13
<b>2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS .....</b>	<b>14</b>
<b>2.4 MARCO LEGAL .....</b>	<b>15</b>
<b>CAPÍTULO III: MARCO FILOSÓFICO.....</b>	<b>17</b>
<b>CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACION.....</b>	<b>19</b>
<b>4.1 TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>19</b>
<b>4.2 POBLACIÓN Y MUESTRA DE ESTUDIO .....</b>	<b>19</b>
<b>4.3 ACCIONES Y ACTIVIDADES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO .....</b>	<b>19</b>
<b>4.4 MATERIALES E INSTRUMENTOS.....</b>	<b>20</b>
4.4.1 Demarcación del área de estudio .....	20
4.4.2 Caracterización del uso del territorio y el cambio de uso del suelo .....	20
4.4.3 Análisis climático.....	21
<b>4.5 PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE LA INFORMACIÓN .....</b>	<b>22</b>
4.5.1 Delimitación del área de estudio .....	22
4.5.2 Procesamiento de la información de imágenes satelitales .....	24
4.5.3 Caracterización del uso del territorio y cambio de uso de suelo.....	25
4.5.4 Temperatura superficial terrestre (LST).....	28
4.5.5 Relación de cambio de uso de suelo y variabilidad climática.....	29
4.5.6 Impacto de los cambios de suelo y temperatura sobre la vegetación.....	30
<b>CAPÍTULO V: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>33</b>
<b>5.1 CAMBIO DE USO DEL SUELO .....</b>	<b>33</b>
5.1.1 Uso del territorio para diferentes años.....	33
5.1.2 Cambio de uso del suelo.....	43
5.1.3 Tendencia de cambio de uso de suelo: superficie cultivada.....	47
<b>5.2 VARIABILIDAD CLIMATICA.....</b>	<b>49</b>

<b>5.3</b>	<b>RELACION ENTRE CAMBIO DE USO DE SUELO Y VRIABILIDAD CLIMATICA .....</b>	<b>53</b>
<b>5.4</b>	<b>IMPACTO DE CAMBIOS DE USO DE SUELO Y TEMPERATURA SOBRE LA VEGETACION .....</b>	<b>57</b>
<b>5.4.1</b>	<b>INDICE DE VEGETACION DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI).....</b>	<b>57</b>
<b>5.4.2</b>	<b>EVALUACION DE INDICES DE SALUD DE LA VEGETACION.....</b>	<b>60</b>
	<b>Índice de condición de Temperatura TCI.....</b>	<b>60</b>
	<b>Índice de Condición de vegetación VCI .....</b>	<b>62</b>
	<b>Índice de Salud de vegetación VHI.....</b>	<b>63</b>
<b>5.4.3</b>	<b>Patrones del ICV en la zona de estudio.....</b>	<b>65</b>
<b>5.4.4</b>	<b>Serie de tiempo del promedio anual del VCI, TCI y VHI de la zona de estudio 66</b>	
<b>5.4.5</b>	<b>Serie y evaluación de los índices de estrés/sequía con la producción en la zona de estudio .....</b>	<b>67</b>
	<b>DISCUSIONES .....</b>	<b>70</b>
	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>76</b>
	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>78</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>79</b>
	<b>ANEXO .....</b>	<b>87</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Características de las imágenes satelitales Landsat utilizadas en el estudio..	20
<b>Tabla 2.</b> Bandas térmicas Landsat 5 y 8: longitudes de onda, resolución espacial y Período de tiempo.....	21
<b>Tabla 3.</b> Índices de vegetación basadas en bandas GREEN, RED y NIR.....	22
<b>Tabla 4.</b> Imágenes de satélite Landsat 5 y 8, identificador de producto, fecha y posición.....	24
<b>Tabla 5.</b> Tipos de uso y cobertura del suelo en el área de estudio.....	26
<b>Tabla 6.</b> Observaciones de la concordancia para el coeficiente kappa.....	28
<b>Tabla 7.</b> Índices de salud de la vegetación.....	30
<b>Tabla 8.</b> Rangos de categorización de los índices de vegetación.....	32
<b>Tabla 9.</b> Uso del suelo para el año 1985.....	33
<b>Tabla 10.</b> Uso del suelo para el año 1990.....	34
<b>Tabla 11.</b> Uso del suelo para el año 1995.....	35
<b>Tabla 12.</b> Uso del suelo para el año 2000.....	36
<b>Tabla 13.</b> Uso del suelo para el año 2005.....	37
<b>Tabla 14.</b> Uso del suelo para el año 2010.....	37
<b>Tabla 15.</b> Uso del suelo para el año 2015.....	38
<b>Tabla 16.</b> Uso del suelo para el año 2021.....	39
<b>Tabla 17.</b> Evaluación de la precisión del uso de suelo y la cobertura entre 1985 y 2021.	40
<b>Tabla 18.</b> Uso del suelo para el año 1985 -2021.....	42
<b>Tabla 19.</b> Cambio de uso total para el periodo1985-1990.....	43
<b>Tabla 20.</b> Cambio de uso total para el periodo1990-1995.....	43
<b>Tabla 21.</b> Cambio de uso total para el periodo 1995-2000.....	44
<b>Tabla 22.</b> Cambio de uso total para el periodo 2000-2005.....	44
<b>Tabla 23.</b> Cambio de uso total para el periodo 2005-2010.....	45
<b>Tabla 24.</b> Cambio de uso total para el periodo 2010-2015.....	45
<b>Tabla 25.</b> Cambio de uso total para el periodo 2015-2021.....	46
<b>Tabla 26.</b> Cambio de uso de suelo y sin cambio periodo 1985-2021.....	46

<b>Tabla 27.</b> Tasa de cambio por unidad de cobertura 1985-2021.....	48
<b>Tabla 28.</b> Estadísticas de TST para el periodo de estudio.....	50
<b>Tabla 29.</b> Prueba de correlación años y TST.....	51
<b>Tabla 30.</b> Resumen de modelo de TST.....	51
<b>Tabla 31.</b> Coeficientes de la recta de regresión de TST.....	52
<b>Tabla 32.</b> Variación de cambio de uso de suelo y media de TST .....	53
<b>Tabla 33.</b> Prueba de normalidad.....	53
<b>Tabla 34.</b> Prueba de correlación bivariada cambio de uso y TST.....	55
<b>Tabla 35.</b> Resumen del modelo .....	56
<b>Tabla 36.</b> Coeficientes de la recta de regresión.....	56

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de ubicación irrigación La Yarada .....	23
<b>Figura 2.</b> Diagrama flujo para el procesamiento de imágenes satelitales en la plataforma Google Earth Engine (1985-2021).....	25
<b>Figura 3.</b> Mapa de cobertura de uso de suelo año 1985.....	34
<b>Figura 4.</b> Mapa de cobertura de uso de suelo año 1990.....	34
<b>Figura 5.</b> Mapa de cobertura de uso de suelo año 1995.....	35
<b>Figura 6.</b> Mapa de cobertura de uso de suelo año 2000.....	36
<b>Figura 7.</b> Mapa de cobertura de uso de suelo año 2005.....	37
<b>Figura 8.</b> Mapa de cobertura de uso de suelo año 2010.....	38
<b>Figura 9.</b> Mapa de cobertura de uso de suelo año 2015.....	39
<b>Figura 10.</b> Mapa de cobertura de uso de suelo año 2021.....	40
<b>Figura 11.</b> Coberturas de uso de suelo durante los años de estudio .....	42
<b>Figura 12.</b> Cambio de uso de suelo durante el periodo 1985-2021.....	47
<b>Figura 13.</b> Tendencia de la superficie cultiva según algoritmos de ML, RF, CART y XGBoost, para el periodo 1985 a 2021.....	48
<b>Figura 14.</b> Mapas temperatura superficial terrestre zona de estudio años 1985 - 2021.	49
<b>Figura 15.</b> Diagrama de caja y bigotes de temperatura superficial terrestre.....	50
<b>Figura 16.</b> Tendencia de la temperatura media periodo 1985 - 2021.....	52
<b>Figura 17.</b> Prueba de normalidad de cambio de uso de suelo.....	54
<b>Figura 18.</b> Prueba de normalidad de temperatura media.....	54
<b>Figura 19.</b> Regresión lineal variables cambio de uso de suelo y TST.....	57
<b>Figura 20.</b> Mapa de estado fitosanitario del área de cultivo, según índice de NDVI periodo 1985 a 2021.....	58
<b>Figura 21.</b> Variación temporal de cobertura de biomasa en los índices NDVI período 1985 a 2021.....	58
<b>Figura 22.</b> Curvas Reflectancia versus Longitud de onda para suelo desnudo, agua y estados fitosanitarios de olivo .....	59
<b>Figura 23.</b> Mapas TCI (índice de condición de la temperatura) de la irrigación	

La Yarada para los años 1985 al 2021.....	61
<b>Figura 24.</b> Diagrama de caja y bigotes de Índice de condición de temperatura.....	61
<b>Figura 25.</b> Mapas VCI (índice de condición de la temperatura) de la irrigación La Yarada para los años 1985 al 2021.....	62
<b>Figura 26.</b> Diagrama de caja y bigotes de Índice de condición de vegetación.....	63
<b>Figura 27.</b> Mapas VHI (índice de condición de salud de la vegetación) años 1985 al 2021.....	64
<b>Figura 28.</b> Diagrama de caja y bigotes de Índice de salud de vegetación.....	65
<b>Figura 29.</b> Porcentaje de condiciones de estrés/sequía periodo 1985-2021.....	65
<b>Figura 30.</b> Series de tiempo del promedio anual del VCI, TCI y VHI y rendimiento en la zona de estudio.....	67
<b>Figura 31.</b> Serie de producción de olivo en la zona de estudio periodo 1985-2021.....	68
<b>Figura 32.</b> Análisis de correlación de Pearson de la serie de tiempo anual de índices de vegetación y producción de olivo.....	69

## RESUMEN

El presente estudio conlleva a determinar y analizar los cambios de uso de suelo y la variabilidad climática que se viene generando a través del tiempo en la zona agrícola, estudio de tipo aplicada, descriptiva, de diseño no experimental, trazó su objetivo general en determinar el uso indiscriminado de tierra para cultivos irrigados en un acuífero sobreexplotado y su influencia en el cambio climático. Mediante el uso de imágenes satelitales de libre disposición y técnicas de Machine learning se determinó el uso de suelo de la zona para los años 1985 - 2021, estos datos permitieron realizar el análisis de cambio de uso; asimismo, se realizó el análisis de la variabilidad climática mediante la determinación de la Temperatura superficial terrestre, y finalmente se realizó la relación y análisis estadístico entre el cambio de uso y la variable climática, permitiendo determinar los Índices de sequía: Índice de condición de Temperatura, Índice de condición de vegetación y Índice de salud de vegetación. Los resultados indican, que el cambio de uso de suelo más representativo fue: de suelo desnudo a uso agrícola, determinándose un incremento del área de uso agrícola de 22 382,9 ha., significando el 373,2 % durante el periodo 1985 a 2021, y que durante el periodo 2015 a 2021 se registró el mayor incremento cambio de uso de suelo con un total de 9 308 ha. En relación los índices de sequía se determinó que los valores de VCI se incrementan en forma continua desde el año 1985 hasta 2021, con valores desde 0,1 hasta 0,98; mientras que los valores de TCI no muestran un patrón definido durante los años, observándose condiciones de sequía durante años 2000, 2005 y 2010, y sin sequía los años 1985, 1990, 1995, 2015 y 2021; El índice de salud de vegetación indica que los años 1990, 2000, 2005 y 2010 presentaron condiciones de sequía leve a moderada, y los años 1985, 1995, 2015 y 2021 no presentaron condiciones de sequía. Estas anomalías están relacionadas con la variabilidad y el cambio climático detectados en la zona de estudio.

Palabras clave: uso de suelo, Olivo, cambio climático, Machine learning; acuífero sobreexplotado

## ABSTRACT

Climate change has been generating uncertainty in water availability and, in turn, problems in food security at a regional, national and global level; In this region, the olive tree is the most economically important crop, and it is essential to determine its spatial and temporal evolution, in order to adequately manage the irrigation that comes from the groundwater of the Caplina aquifer, under current conditions of overexploitation. Using freely available satellite images and Machine learning techniques, it was determined that the agricultural area grew by 373,2 % in the period 1985 to 2021, being the period of greatest increase between the years 2015 to 2021. Likewise, the VCI values increase continuously in the period 1985 to 2021 (from 0,1 to 0,98), meaning that there are no drought conditions. On the other hand, the TCI index presents values that do not show a defined pattern during the years of study, observing drought in the years 2000, 2005 and 2010, and without drought in the years 1985, 1990, 1995, 2015 and 2021. The VHI index indicates that the years 1990, 2000, 2005 and 2010 presented drought (mild to moderate), while the years 1985, 1995, 2015 and 2021 exhibit conditions without drought. These anomalies are associated with the variability and climate change identified in the study region.

Keywords: land use; Olive; climate change, Machine learning; overexploited aquifer

## RESUMO

As alterações climáticas têm gerado incerteza na disponibilidade de água e, por sua vez, problemas na segurança alimentar a nível regional, nacional e global; Nesta região, a oliveira é a cultura de maior importância económica, tornando essencial determinar a sua evolução espacial e temporal, para gerir adequadamente a irrigação que provém das águas subterrâneas do aquífero Caplina, nas atuais condições de sobreexploração. Utilizando imagens de satélite disponíveis gratuitamente e técnicas de Machine Learning, apurou-se que a área agrícola cresceu 373,2 % no período de 1985 a 2021, sendo o período de maior aumento entre os anos de 2015 a 2021. Da mesma forma, os valores do VCI aumentam continuamente no período de 1985 a 2021 (de 0,1 a 0,98), o que significa que não há condições de seca. Por outro lado, o índice TCI apresenta valores que não apresentam padrão definido durante os anos de estudo, com seca observada nos anos de 2000, 2005 e 2010, e sem seca nos anos de 1985, 1990, 1995, 2015 e 2021. O índice VHI indica que os anos de 1990, 2000, 2005 e 2010 apresentaram seca (leve a moderada), enquanto os anos de 1985, 1995, 2015 e 2021 apresentam condições sem seca. Estas anomalias estão associadas à variabilidade e mudanças climáticas identificadas na região de estudo.

Palavras-chave: uso do solo; Oliva; alterações climáticas, aprendizagem automática; aquífero sobreexplorado

## INTRODUCCIÓN

Los Naciones Unidas mediante los Objetivos de Desarrollo Sostenible tienen como objetivo principal la mitigación del cambio climático y la preservación del medio ambiente (Zhang et al., 2023). En este contexto, es esencial destacar que la gestión eficiente del suelo agrícola está estrechamente relacionada con la optimización del uso del agua (Gebre et al., 2023; Wu et al., 2023), especialmente en áreas caracterizadas por condiciones áridas y semiáridas, donde la escasez de agua se agrava debido a las actividades humanas y el cambio climático (Er-Raki & Chehbouni, 2023). Además, para satisfacer la creciente demanda mundial de alimentos con recursos hídricos limitados, es crucial identificar el estrés hídrico en los cultivos (Safdar et al., 2023).

Los avances científicos, incluyendo la inteligencia artificial (IA) y las tecnologías de comunicación de datos, han generado un amplio abanico de oportunidades en la investigación científica (Kua et al., 2021). En este contexto, el Machine Learning (ML), una rama de la IA, emplea algoritmos para identificar patrones en grandes conjuntos de datos y realizar predicciones (Wiemken & Kelley, 2020; Zhang et al., 2019). La rápida evolución de sistemas de detección remota, mecatrónica, robótica, análisis de big data e IA ha transformado la agricultura al permitir una gestión más precisa, eficiente y rentable (Kakarla et al., 2022; Singh et al., 2022). En los últimos años, la IA se ha consolidado como una herramienta fundamental en la detección de situaciones de estrés en plantas causadas por enfermedades y plagas (EM Pino-Vargas & Huayna, 2022), así como en la clasificación de distintas coberturas de cultivos (Paymode & Malode, 2022).

Además, el crecimiento de las tecnologías satelitales ha llevado a una abundante disponibilidad de datos de teledetección (Khiali et al., 2019). Estos datos son apreciados por su objetividad, rapidez, carácter no destructivo y extensa cobertura geográfica (Hentze et al., 2016; Ma et al., 2022). En vista de las crecientes necesidades de información, la observación colaborativa de alta precisión se vuelve cada vez más urgente (Deng et al., 2023).

Las imágenes satelitales son cruciales para la distinción espacial y temporal, así como para la cartografía de las dinámicas de los sistemas agrícolas (Lebrini et al., 2019; Li et al., 2022). El análisis geoespacial se ha vuelto de gran relevancia a nivel global debido a su enfoque en la sostenibilidad (Moro et al., 2022; Silber et al., 2023).

Las secuencias temporales de imágenes satelitales ofrecen una amplia gama de datos y logran un equilibrio adecuado en términos de resolución espacial, espectral y temporal (Solano-Correa et al., 2017). La comprensión de las variaciones en los parámetros de los cultivos a lo largo del tiempo permite tomar decisiones de gestión acertadas, como la fertilización y el riego, entre otras (Peprah et al., 2021).

Las firmas espectrales son fundamentales para llevar a cabo un mapeo completo de la distribución de grupos de especies vegetales (Britz et al., 2022). La creación de una biblioteca espectral es de gran relevancia para la interpretación y mapeo de cultivos utilizando sensores remotos (Zhang et al., 2019).

El mapeo de especies vegetales en zonas áridas resulta fundamental para gestionar eficazmente los recursos hídricos (Kedia et al., 2021). La utilización de imágenes hiperespectrales y enfoques de aprendizaje automático profundo permite la clasificación precisa de la vegetación (Liu et al., 2022; Rao et al., 2007). De esta manera, se vuelve imperativo identificar el estrés hídrico en los cultivos mediante estas técnicas, lo que contribuirá a una gestión adecuada del riego en la agricultura.

En la zona de riego de La Yarada, se establece un sistema de cultivo en el que el olivo es la especie predominante debido a su uso eficiente del agua. El riego se realiza con agua subterránea extraída del acuífero Caplina. Sin embargo, este acuífero enfrenta serios problemas de intrusión marina, principalmente debido a un desequilibrio entre la recarga natural y la extracción de agua (Pino, 2019).

En el contexto actual de globalización, la competitividad impulsa a los agricultores a producir productos de mayor calidad, cumpliendo con plazos y oportunidades precisas. Se proponen nuevos enfoques para que los olivares tradicionales recuperen su sostenibilidad y viabilidad en un mercado internacional altamente competitivo (Gomes et al., 2020). Estas estrategias incluyen la diferenciación y clasificación de aceites de oliva, la diversificación de cultivos, el desarrollo de productos no agrícolas y la creación de

nuevos productos relacionados con la agricultura (D'Adamo et al., 2019; Duarte et al., 2008; Millán et al., 2014).

La región de Tacna es la principal zona de producción de aceitunas y esta actividad constituye el eje central de la economía agrícola. Es crucial contar con registros estadísticos que abarquen aspectos como la superficie cultivada, rendimientos, variedades y canales de comercialización. Estos datos deben ser monitoreados por tanto instituciones públicas como privadas. Además, se requiere una evaluación exhaustiva de las prácticas de gestión, especialmente en lo que respecta al uso del agua, dada su disponibilidad limitada. Cualquier desviación en el uso adecuado del agua podría resultar en consecuencias negativas, como el estrés hídrico. Por lo tanto, se vuelve esencial analizar la evolución de los patrones de uso del suelo en el área de riego de La Yarada a lo largo del tiempo y en diversas ubicaciones geográficas. Esto permitirá una gestión más efectiva del riego que depende del agua subterránea, particularmente en un acuífero que se enfrenta a una extracción excesiva de recursos hídricos. Este análisis se basa en el uso de datos de imágenes satelitales de acceso público.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

##### **1.1.1. Identificación del problema**

La quema de combustibles fósiles y los cambios en el uso de la tierra son dos de los mayores contribuyentes a las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Se elimina la cobertura para diversos fines, como la urbanización y la agricultura, se cambia el uso del suelo; asimismo, piensa que los cambios en el uso de la tierra son uno de los factores que contribuyen al cambio climático, pero que estos cambios también pueden conducir a cambios en el uso de la tierra. “Es una interacción complicada entre causa-efecto” (Salvador, 2017).

Uno de los principales efectos del cambio de uso del suelo y de la deforestación es la liberación a la atmósfera del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) almacenado en las plantas. En consecuencia, uno de los principales motores del cambio climático es la alteración del uso de la tierra, que provoca una serie de cambios climáticos y ecológicos. (Salvador, 2017).

El IPCC confirma además que el cambio climático ha tenido y tendrá impactos extensos y profundos en los sistemas humanos y naturales, las futuras vías socioeconómicas, la adaptación y la mitigación, y la gobernanza del riesgo a diferentes niveles afectarán los riesgos relacionados con el clima (Qingchen et al., 2014).

El impacto del cambio climático en las condiciones de esta región, considera a éste como una de las más secas del mundo según la evidencia científica actual, puede manifestarse de manera positiva o negativa en lo que respecta a la disponibilidad de agua (Pino-Vargas et al., 2022).

## **1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.2.1 El problema principal**

¿Cómo es el uso indiscriminado de tierras de cultivo irrigadas en un acuífero sobreexplotado y su influencia sobre el cambio climático?

#### **1.2.1 Problemas secundarios**

1. ¿Cuál es el cambio de uso del suelo en un acuífero sobreexplotado?
2. ¿Cómo se manifiesta el cambio climático en un acuífero sobreexplotado?
3. ¿Existe relación entre el cambio de uso del suelo y el cambio climático en un acuífero sobreexplotado?

## **1.3 JUSTIFICACIÓN EN IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.3.1 Justificación social**

Estudio que permitirá conocer los cambios que se vienen generando en el ambiente debido a factores antrópicos como ser el crecimiento poblacional, los cambios de uso de la tierra, conllevando al uso sin un control del recurso hídrico, que cada vez viene escaseando y contaminando, y que en un futuro cercano tiende a generar conflictos sociales.

### **1.3.2 Justificación académica**

El estudio tiende a adquirir nuevos conocimientos, ya que conlleva a la utilización de metodologías geoespaciales como ser el uso de imágenes satelitales, índices calculados de imágenes satelitales del repositorio Google Earth Engine - GEE.

### **1.3.3 Justificación técnica-ambiental**

El estudio tiende a evaluar o determinar los cambios en las variables climatológicas, producidos por los constantes cambios de uso de suelo, ocasionando cambios diversos en factores abióticos y bióticos del ambiente.

### **1.3.4 Importancia de la investigación**

La investigación tiene como objetivo analizar y evaluar los cambios en el uso del suelo en el área de estudio, así como realizar una comparación de estos cambios. Además, se llevará a cabo un análisis de la variabilidad climática durante el período de 1999 a 2021. y se investigarán las posibles implicaciones entre ambos procesos en el acuífero

sobreexplotado ubicado en el distrito de La Yarada-Los Palos. El propósito es contribuir a una mejor planificación del territorio y prevenir el deterioro de los ecosistemas naturales

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo general**

Determinar el uso indiscriminado de tierra para cultivos irrigados en un acuífero sobreexplotado y su influencia en el cambio climático.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

2. Determinar el cambio de uso de suelo en un acuífero sobreexplotado
3. Determinar el cambio climático en un acuífero sobreexplotado
4. Determinar la relación entre el cambio de uso del suelo y el cambio climático en un acuífero sobreexplotado

## **1.5 HIPÓTESIS**

### **1.5.1 Hipótesis general**

El uso indiscriminado de tierra para cultivos irrigados en un acuífero sobreexplotado influye significativamente en el cambio climático.

### **1.5.2 Hipótesis específicas**

1. El cambio de uso del suelo influye negativamente en un acuífero sobreexplotado
2. El cambio climático influye significativamente en un acuífero sobreexplotado
3. El cambio de uso del suelo y el cambio climático influye en el acuífero sobreexplotado.

## **1.6 VARIABLES**

### **1.6.1 Identificación de las variables**

#### **VI: Independiente**

Cambios de uso/cobertura de la tierra

#### **VD: Variable dependiente**

Variabilidad climática (Temperatura)

## 1.6.2 Caracterización de las variables

**El cambio de uso/cobertura de tierra**, se refiere en la forma en que los seres humanos utilizan o gestionan la tierra que provoca un cambio en la superficie terrestre (IPCC, 2000).

**Variabilidad climática**, La variabilidad climática se refiere a fluctuaciones en la temperatura, precipitación, patrones de vientos y otras variables climáticas en escalas de tiempo que van de años a millones de años. Las causas de la variabilidad climática se consideran naturales debido a factores internos del sistema climático (Glosario IPCC, 2013, 9.6).

### ➤ Definición operacional de las variables

#### **El cambio de uso/cobertura de tierra**

Tipos de coberturas y variación de área resultante del proceso de uso actual de la tierra.

#### **Variabilidad climática**

Unidades de medida, las cuales presentan variaciones con relación a las condiciones ambientales.

## 1.6.3 Operacionalización de las variables

En el cuadro adjunto se describe la operacionalización de las variables utilizadas en el trabajo de investigación.

### *Operacionalización de las variables*

Variable	Definición conceptual	Dimensión	Indicador	Escala
Cambio de uso de suelo	Cambio de uso de suelo por la actividad antrópica, lo cual puede resultar en una modificación de la cobertura terrestre.	Uso de suelo	Tipo de uso (ha.)	Nominal
		Cambio de uso	Ganancia de cobertura (ha)	Nominal
			Perdida de cobertura (ha)	Nominal
Variabilidad climática	Variaciones en las condiciones climáticas (temperatura)	Índice de condición de temperatura	Rangos de clases	Nominal
		Índice de Vegetación	Rangos de clases	Nominal
		Índice de salud de vegetación	Rangos de clases	Nominal

Nota. Elaboración propia

## **1.7 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN**

La presente investigación se centra en el estudio del comportamiento de dos variables que tienden a variar a lo largo de los años debido a causas tanto antrópicas (como el cambio en el uso del suelo) como a factores ambientales. Sin embargo, debido a la falta de información sobre el uso del suelo en varios períodos y la limitada disponibilidad de datos climatológicos en la zona de estudio, hemos decidido llevar a cabo la investigación utilizando información satelital. El uso de información satelital presenta ciertas limitaciones, ya que implica el uso de plataformas de sistemas de información geográfica que requieren la adquisición de nuevos conocimientos para aprovechar al máximo los datos satelitales disponibles tanto en términos de uso del suelo como de información climatológica.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 ANTECEDENTES DEL ESTUDIO**

##### **2.1.1 Antecedentes internacionales**

Pabón et al., (2013), con su investigación “Modelamiento del efecto del cambio en el uso del suelo en el clima local-regional sobre los andes colombianos”, publicada en la revista Académica Colombia Ciencia. El objetivo del estudio es identificar la señal del efecto del cambio del uso de suelo en el clima de la región; para lo cual utilizó el modelo PRECIS se efectuó la simulación del clima de una región localizada en los Andes colombianos, para explorar el impacto del cambio en el uso del suelo en el clima regional, utilizando información meteorológica de 21 estaciones; la recolección de la información se realizó mediante encuesta y el instrumento utilizado fue el cuestionario y se obtuvo como resultados: la temperatura del aire, si bien presenta cambios en respuesta a la intervención del uso del suelo, no mostró un patrón claramente definido y los cambios aún bajo un mismo tipo de modificación de uso del suelo para diferentes sitios fueron opuestos (aumento o disminución); lo cual permitió llegar a la conclusión que las modificaciones locales en el uso del suelo generan cambios de las variables climatológicas (temperatura media anual del aire y precipitación anual) en la escala local.

García et al., (2020), con su investigación “Cambio de uso de suelo y variabilidad climática en Chiautzingo, Puebla, México”, publicada revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático. El objetivo del estudio fue analizar el cambio de uso del suelo y la variabilidad climática para el periodo 1984-2018 en el municipio de Chiautzingo - Puebla, México a partir de imágenes del satélite Landsat en sistemas de información geográfica; para lo cual, se analizaron datos históricos de tres estaciones climatológicas y a través de una encuesta a productores, se recabo información sobre la percepción tanto del fenómeno del cambio de uso de suelo como de variabilidad climática; los resultados indican que el cambio de uso de suelo está relacionado con la

pérdida de superficie forestal, con una tasa de cambio anual de -0,57 %. El incremento de la superficie destinada a agricultura protegida fue de 310,58 ha, el cual ejerce alta presión sobre los recursos bióticos y abióticos. También se encontró que existe variabilidad climática, la cual es percibida por la población.

Yang et al (2019), con su investigación “Impacto del uso de la tierra y el cambio climático en los servicios ecosistémicos relacionados con el agua en Kentucky, EE. UU.”, publicada revista ELSEIVER. El objetivo de este estudio es proporcionar una evaluación integral de los servicios ecosistémicos relacionados con el agua y mejorar la comprensión de cómo se ven afectados por el uso de la tierra y el cambio climático en Kentucky, EE. UU. Utilizando modelos InVEST y escenarios ambientales, este estudio cuantifica en primer lugar los servicios ecosistémicos relacionados con el agua de manera espacialmente limpia. Los resultados revelan que, a nivel estatal, el cambio climático tiene un impacto mayor que el uso del suelo en la retención de agua, mientras que el cambio de uso de la tierra tiene un mayor impacto en la retención del suelo, la exportación de nitrógeno. y la exportación de fósforo. Tanto el cambio climático como el cambio de uso de la tierra ejercen un efecto inhibitorio significativo sobre la retención de agua, la exportación de nitrógeno y la exportación de fósforo. La importancia relativa y las influencias combinadas del uso de la tierra y el cambio climático también dependen de la escala y la composición del paisaje. Comprender los impulsores de los servicios ecosistémicos en el contexto del cambio global puede proporcionar conocimientos críticos para el desarrollo de políticas prácticas y aplicaciones de gestión de la tierra

Ochoa et al., (2016), con su investigación “Uso de la tierra y variabilidad climática en la subcuenca Panajachel, Soloma, Guatemala”, publicada en la revista Única 2016. El objetivo de este estudio es investigar la relación entre el uso de la tierra y la variabilidad climática en la subcuenca del río Panajachel, dentro de la cuenca del lago Atitlán. Para lograr esto, se realizó una caracterización del uso de la tierra, se recopiló información y se llevó a cabo un análisis estadístico mediante metodologías participativas. Los resultados obtenidos indican que, al comprender la relación entre el uso de la tierra y la variabilidad climática, es posible contribuir a la solución de problemas ambientales y mejorar las condiciones de los ecosistemas. Esto permite desarrollar estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático que sean pertinentes y contextualizadas.

Samaniego (2013), con su investigación “Análisis de vulnerabilidad en zonas potenciales de recarga hídrica por efectos de cambios de uso de suelo y por variabilidad climática en la Microcuenca del Río Purires, Costa Rica”, tesis sustentada en CATIE. El objetivo de este estudio es analizar la vulnerabilidad de las zonas de recarga hídrica debido a cambios históricos en el uso del suelo y en condiciones de variabilidad climática. El propósito es proporcionar herramientas técnicas que permitan definir estrategias y acciones para la gestión sostenible de estas áreas. El principal resultado obtenido se refiere al nivel de influencia que ejercen los aumentos de temperatura y la disminución de las lluvias en las zonas de interés. En general, se observa que el patrón de recarga hídrica se ve afectado negativamente en aproximadamente un 13% en comparación con los niveles que presentaba en los años base (2011 y el registro climático correspondiente a 1952-2009). En resumen, se puede concluir que las alteraciones en los patrones climáticos impactan directamente en los sistemas de recarga de agua, y las estimaciones indican que la disminución de las precipitaciones tiene un efecto adverso en la recarga de los acuíferos en todas las ubicaciones, disminuyéndola en un 13 %.

### **2.1.2 Antecedentes nacionales**

Ttito (2020), llevó a cabo una investigación titulada "Cambio de uso de suelo y variabilidad climática en la cuenca media del Vilcanota (Valle Sagrado de los Incas), período 1975 - 2015", como parte de su trabajo en la Universidad Nacional San Carlos. El objetivo del estudio fue evaluar y analizar el cambio de uso de suelo y su relación con la variabilidad climática en la cuenca media del Vilcanota (Valle Sagrado de los Incas) durante el período de 1975 a 2015. Para lograr este objetivo, se empleó un diseño no experimental con un enfoque cuantitativo y un nivel correlacional. La muestra incluye diferentes usos del territorio dentro de la cuenca y datos históricos de estaciones meteorológicas. Como resultado, se identificaron tres unidades de cobertura y se analizó el cambio en una vez de ellas. Los hallazgos del estudio indicaron una compensación entre el cambio de uso del suelo y la variabilidad climática. Esta relación se supervisa en las zonas alta y media alta, donde no existe una intervención antrópica significativa. En contraste, en las zonas media, media baja y baja, el aumento de la temperatura y la variación en la precipitación favorecieron el cambio de uso de suelo, principalmente debido a la acción humana.

### **2.1.3 Antecedentes regional o local**

Espinoza-Molina et al., (2022), con su investigación “Análisis espaciotemporal de las islas de calor urbanas en relación con el desarrollo urbano, en la vecindad del desierto de Atacama”, publicada en la revista *climate*. El objetivo del estudio es determinar las variaciones espaciales y temporales de las islas de calor urbanas (UHI) en el período de 1985 a 2020. Para ello, se empleó un diseño no experimental con un enfoque cuantitativo. Inicialmente, se adquirieron datos del repositorio de Google Earth Engine, incluidos LANDSAT/LT05/C01/T1\_SR y LANDSAT/LC08/C01/T1\_SR, para continuar con la evaluación promedio anual de imágenes obtenidas desde los años 1985 al 2020, y se corrigen radiométrica, atmosférica y geoméricamente al nivel de reflectancia en la superficie de la Tierra y se obtuvo como resultado, un cambio en el clima en la ciudad de Tacna debido al cambio de uso/cobertura del suelo (LUCC). En las zonas edificadas, se observan temperaturas que varían desde los 24,2 °C hasta los 44,2 °C. En áreas con vegetación, las temperaturas se mantienen por debajo de los 24 °C, lo que está relacionado con una alta tasa de evapotranspiración potencial. Estos hallazgos nos llevan a la conclusión de que las variaciones en la forma y el crecimiento urbano han dado lugar al desarrollo de patrones térmicos superficiales intraurbanos.

## **2.2 BASES TEÓRICAS**

### **2.2.1 Cambio de uso de suelo**

Alteración del uso o la gestión humana de la tierra, que puede provocar cambios en la cobertura terrestre.

#### **Uso de suelo**

se refiere a la finalidad o función para la que la población humana local utiliza el suelo. También puede definirse como las actividades humanas que están directamente relacionadas con el suelo e implican el uso de sus recursos o su influencia sobre ellos (Pérez, 2021)

**Tipo de cobertura**, permite identificar y caracterizar las coberturas según el estado natural y tipo de uso.

Indicador: tipo de cobertura o uso de suelo

### **Cambio de uso**

Se trata del proceso de modificación de la vegetación cubierta existente en un sitio particular con el objetivo de cambio (Pérez, 2021)

### **Ganancia de cobertura**

Permite determinar la ganancia de cobertura en las diferentes unidades de tipo de cobertura, en relación a la comparación de dos periodos de análisis.

### **Pérdida de cobertura**

Permite determinar la pérdida de cobertura en las diferentes unidades de tipo de cobertura, en relación a la comparación de dos periodos de análisis.

## **2.2.2 Variabilidad climática**

Se refiere a fluctuaciones en la temperatura, precipitación, patrones de vientos y otras variables climáticas en escalas de tiempo que van de años a millones de años.

### **Caracterización de la temperatura**

Evaluación del comportamiento de la temperatura del aire en periodos de tiempo, la cual permitirá conocer la tendencia de la temperatura.

### **Tendencia**

Permite determinar el incremento o decremento de la temperatura en relación a los años de estudio

### **Caracterización climática**

El proceso de caracterización climática implica identificar y caracterizar varios tipos climáticos utilizando una combinación de índices de temperatura y precipitación durante varios periodos de tiempo en la zona de estudio. Para comprender la variabilidad climática es necesario conocer este elemento.

## **2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS**

### **Cambio climático**

El término "cambio climático" hace referencia a una variación prolongada, normalmente decenal o de mayor duración, estadísticamente significativa del estado medio del clima o de su variabilidad. Este cambio climático puede ser el resultado de procesos naturales internos, de cambios forjados en el exterior o de cambios crónicos inducidos por el hombre en la composición de la atmósfera o en el uso del suelo ( Damonte, 2017, p.40)

### **Variabilidad climática**

La variabilidad climática se refiere a los cambios en el clima que se producen a lo largo de dos o más periodos de tiempo; estos cambios pueden darse entre el día y la noche, entre estados o de un año a otro. Por ejemplo, si este año es más frío y seco que el anterior, podríamos decir que este año hay una mayor variabilidad climática en términos de temperatura. Lo mismo puede aplicarse a las precipitaciones y otros indicadores climáticos. (Damonte, 2017, p.19)

### **Uso de suelo**

Se trata de la manera en la cual los seres humanos utilizan estos objetos biofísicos para cumplir con las necesidades materiales y espirituales (Chilar y Jansen 2001). Los aspectos del uso del suelo provienen de la interacción entre elementos físicos o naturales y elementos culturales y humanos. (Mendoza et al., 2015, p.10)

### **Cambio de uso**

Se refiere a la apropiación y utilización diferente del espacio geográfico en comparación con su uso natural o cultural previo, los cambios determinados pueden ser la transformación de áreas agrícolas en áreas urbanas o cuerpos de agua. También se considera cambio de uso cuando una masa de agua deja de serlo y se convierte en zona de desarrollo urbano, vegetación de cobertura baja u otro tipo de vegetación natural. (Andalón et al. 2005, P.10)

### **Uso indiscriminado**

Este proceso implica la modificación del entorno, particularmente a través de la degradación del suelo, lo cual es perjudicial y tiene un impacto negativo en el desarrollo de la población. Una de las consecuencias más notables es la disminución del rendimiento de los cultivos cuando la degradación del suelo continúa. Con el tiempo, también puede cambiar el uso de esa tierra, pasando de ser cultivable a convertirse en área de pastoreo; posteriormente, se llena de maleza y, finalmente, se vuelve árida o desértica. (Rojas & Ibarra, s. f.)

### **Acuífero**

El acuífero es la capa del subsuelo a través de la cual fluye el agua subterránea. El límite inferior impermeable del acuífero se denomina "muro" y el superior "techo". El término "acuífero libre" se refiere al estado de la atmósfera cuando el agua entra en contacto con ella a través de poros o fisuras en una zona que no está saturada. Por el contrario, en un acuífero cerrado, el techo está sometido a una presión mayor que la atmosférica. (Yepes, 2008).

### **Acuífero sobreexplotado**

La sobreexplotación se refiere a una situación en la que la cantidad media de agua extraída de un acuario subterráneo supera o se aproxima a la cantidad media recuperada durante varios años. (Pino et al., 2020, p.2)

## **2.4 MARCO LEGAL**

**La Constitución Política del Perú** reconoce en el numeral 22 del artículo 2 el derecho fundamental de todas las personas a disfrutar de un ambiente equilibrado y adecuado para su desarrollo. Además, establece en el artículo 55 que los tratados celebrados por el Estado y en vigor forman parte del derecho nacional. En este sentido, teniendo en cuenta los compromisos asumidos por el Estado peruano a través de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), así como la ratificación del Protocolo de Kyoto y el Acuerdo de París, se han promulgado diversos instrumentos para contribuir a la gestión integral del cambio climático a nivel nacional. Además, tomando en consideración los compromisos asumidos por el gobierno peruano a través de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), así como la

ratificación del Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París, se han introducido diversas herramientas para apoyar la gestión integral del cambio climático a nivel nacional.

El objetivo 7 de la **Política Nacional del Ambiente** es lograr la adaptación de la población al cambio climático y establecer medidas de mitigación orientadas al desarrollo sostenible, esto fue posible gracias al Decreto Supremo N° 012-2009-MINAM. La política se centra en la conservación y el sostenible uso de los recursos naturales y de la diversidad biológica.

**La Estrategia Nacional sobre Cambio Climático**, aprobada mediante el Decreto Supremo N°011-2015-MINAM, demuestra el compromiso del gobierno peruano para enfrentar el cambio climático de manera integral, transversal y multisectorial, en concordancia con los compromisos internacionales asumidos por el país en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). La prevención y las acciones para adecuar la población, los servicios sociales y los sistemas productivos a los efectos del cambio climático son también los principales objetivos de esta estrategia. Sus metas estratégicas incluyen mejorar la población, los individuos económicos y el Estado en su capacidad de adaptación ante los efectos y oportunidades del cambio climático, además de conservar las reservas de carbono y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.

**La Visión del Perú al 2050**, aprobada por los miembros del Foro del Acuerdo Nacional en abril de 2019, plantea un escenario en el que el Perú gestiona su territorio y sus servicios ecosistémicos de manera sostenible para el año 2050. En este escenario, se han logrado reducir de manera significativa los efectos del cambio climático, disminuyendo la deforestación de los bosques y aplicando estrategias de reforestación. Además, se ha logrado una disminución significativa de la emisión de gases de efecto invernadero y se han puesto en marcha mecanismos de adaptación al cambio climático para aumentar la resistencia a sus efectos.

### **CAPÍTULO III**

#### **MARCO FILOSÓFICO**

El cambio de uso de suelo es la suma de transiciones físicas del suelo asociado a las acciones humanas, en forma pragmática, el concepto se refiere al resultado de las actividades socioeconómicas que se desarrollan sobre una cobertura del terreno. La cuantificación de los cambios de uso del suelo a través de la percepción remota junto con las herramientas de análisis que ofrecen los Sistemas de Información Geográfica para modelar los procesos de cambio es una forma muy eficaz para analizar los cambios de un territorio.

El cambio climático es uno de los grandes desafíos de nuestro tiempo y afecta tanto a nuestra vida cotidiana como al orden geopolítico mundial. Es una de las dimensiones de una crisis ecológica planetaria, consecuencia directa de las complejas relaciones entre los seres humanos y la naturaleza.

El cambio climático en curso está impulsado directamente por un aumento en las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero. Asu vez, los GEI antrópicos que están forzando al sistema climático son resultado de diversos procesos productivos y sociales humanos que utilizan intensivamente combustibles fósiles, compuestos químicos sintéticos y/o materia orgánica e inorgánica; dichas actividades interfieren en los ciclos biogeoquímicos del planeta, principalmente los del carbono, nitrógeno y fósforo. Los procesos de obtención y producción de energía y materia prima para los intereses humanos, por medio de la quema de combustibles fósiles y el cambio de uso de suelo, implican alteraciones ambientales profundas y/o irreversibles.

Una de las catástrofes capaz de modificar en gran escala el ambiente de una región es la falta de agua, y sus efectos más espectaculares y dramáticos se manifiestan en la alteración de las actividades económicas habituales, en el deterioro de la calidad y condiciones de vida de los habitantes y en el daño a las condiciones ambientales (flora, fauna y paisaje). Sin embargo, la complejidad del fenómeno propicia la creencia errónea de que después de una sequía severa, no ocurrirá otra igual o de proporciones mayores.

Por ende, con demasiada frecuencia, sobre todo en los países menos desarrollados, no es usual prepararse para su ocurrencia futura, que será una certeza. Esta es la paradoja que hace cada vez más vulnerable a una sociedad que no genera medidas de prevención, porque no espera que suceda lo mismo o algo peor.

El cambio de uso de suelo en La Yarada -Los Palos ha promovido durante los últimos años el cambio de un paisaje natural árido a un paisaje con potencial agrícola limitado a ser una zona de cultivos. El aumento del espacio cultivado se relaciona con el crecimiento de la población a lo largo de los años y al aumento de disponibilidad de pozos para uso agrícola. La ampliación de la frontera agrícola en la zona de estudio ha conllevado un aumento de la explotación del acuífero costero que ha provocado un balance hídrico negativo, el cual perjudica la seguridad hídrica y la estabilidad del ecosistema. Pese a la existencia de mecanismos legales para su protección, los diferentes programas para el desarrollo y el modelo de agricultura actual han causado impactos en la sostenibilidad del acuífero. En este sentido, es importante considerar las prácticas sostenibles mencionadas, con el fin de mejorar el aprovechamiento del agua subterránea.

## **CAPÍTULO IV**

### **METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **4.1 TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN**

##### **Tipo de Investigación**

Los datos recopilados en este diseño son de tipo cuantitativo, y en cuanto a la manipulación de variables, se trata de un diseño no experimental.

##### **Diseño de la investigación**

El diseño correlacional es una técnica de diseño no experimental que busca establecer una relación entre dos variables.

#### **4.2 POBLACIÓN Y MUESTRA DE ESTUDIO**

##### **Población**

En el presente trabajo de investigación, la población en consideración abarca el área de la irrigación La Yarada, la cual se encuentra ubicada en un acuífero sobreexplotado.

##### **Muestra**

Se realizó el muestreo de los diferentes usos del territorio que se encuentran dentro del área de estudio, lo que permitió realizar la validación con las coberturas determinadas en las imágenes satelitales.

#### **4.3 ACCIONES Y ACTIVIDADES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO**

- Realizar el plan de trabajo
- Implementar equipo logístico
- Visita de campo para evaluación
- Coordinación con instituciones afines
- Recopilación de información
- Procesamiento de información
- Validación de los resultados

## 4.4 MATERIALES E INSTRUMENTOS

### 4.4.1 Demarcación del área de estudio

En este estudio se utilizaron las imágenes GeoTIFF de extensión "Aster Global Digital Elevation Model" (DEM) con una resolución de 30 metros. Estas imágenes están disponibles en el repositorio de datos del Ministerio de Medio Ambiente.

Utilizando estas imágenes y la base de datos de la Autoridad Nacional del Agua sobre el inventario de recursos hídricos subterráneos, se ha permitido la demarcación de los límites del acuífero La Yarada, en el cual se encuentra ubicada la zona de estudio.

### 4.4.2 Caracterización del uso del territorio y el cambio de uso del suelo

En la Tabla 2 se presenta una lista de las imágenes satelitales utilizadas en este estudio para llevar a cabo la caracterización del uso del suelo. Estas imágenes fueron obtenidas de la base de datos del USGS (United States Geological Survey), que almacena imágenes capturadas por el programa Landsat. El programa Landsat ha estado en funcionamiento desde 1972 y ha utilizado una serie de sensores, desde el Sensor Landsat 1 hasta el más reciente Landsat 9, para observar y recopilar información sobre la Tierra.

Tabla 1

*Relación de Imágenes Satélites Landsat 5 y 8 utilizadas en el estudio*

Año	Fuente	Número de bandas	Sensor	Formato de imagen
1985	USGS	7	Landsat L4-5 TM	GeoTIFF
1990	USGS	7	Landsat L4-5 TM	GeoTIFF
1995	USGS	7	Landsat L4-5 TM	GeoTIFF
2000	USGS	7	Landsat L4-5 TM	GeoTIFF
2005	USGS	7	Landsat L4-5 TM	GeoTIFF
2010	USGS	7	Landsat L4-5 TM	GeoTIFF
2015	USGS	11	Landsat L8 OLI/TIRS	GeoTIFF
2021	USGS	11	Landsat L8 OLI/TIRS	GeoTIFF

Nota: Características de las imágenes satelitales, años, bandas y formato. Fuente: USGS

Las imágenes se seleccionan cuidadosamente, eligiendo aquellas que presenten una buena visibilidad, es decir, sin la presencia de nubes u otras obstrucciones. Además, se procuró

que las imágenes fueran de épocas similares, lo que facilita la clasificación con un menor margen de error.

#### 4.4.3 Análisis climático

##### Temperatura de la superficie terrestre (LST)

Dado que en zona de estudio sólo cuenta con una estación meteorológica el cual no permite extrapolar la variable temperatura para toda la zona de estudio limitando obtener resultados representativos, por lo que se ha visto por conveniente emplear información satelital disponible y que abarca la zona de estudio. La fuente de datos de este trabajo se refiere a las adquisiciones de Landsat 5 y 8 (Tabla 2), proporcionadas por el USGS e incluidas en el catálogo de datos de Google Earth Engine (GEE). GEE brinda un fácil acceso a los productos satelitales y su procesamiento es directamente en la plataforma, sin necesidad de descargarlos, lo que hace factible la combinación y el procesamiento simultáneo de imágenes.

La temperatura de la superficie terrestre (LST) se refiere a la temperatura que experimentaríamos al tocar directamente la superficie del suelo con nuestras manos o la temperatura de la capa superior del suelo. Es un aspecto crucial que ha sido objeto de atención destacada en el desarrollo de técnicas para medirla desde el espacio. La LST es un elemento importante en varios campos de investigación, como el cambio climático a nivel mundial, los procesos hidrológicos y agrícolas, y el uso y la protección del suelo in áreas urbanas. (Avdan & Jovanovska, 2016)

Tabla 2

*Bandas térmicas de imágenes satelitales Landsat 5 y 8: longitudes de onda, resolución espacial y período de tiempo*

	Banda(s) Térmica(s)	Longitud de onda (µmetro)	Resolución espacial (m)	Periodo de tiempo
Landsat 5	Banda 6	10,40-12,5	120 (30)	febrero de 1993 a febrero de 2007
Landsat 8	Banda 10	10,60-11,19	100(30)	Marzo de 2015-marzo de 2021
	Banda 11	11,50-12,51		

Nota: Características de las bandas térmicas, longitud de onda y periodo de tiempo

## Determinación de Índices

Los índices de vegetación (IV) se determinan utilizando datos recopilados por sensores remotos y se emplean tanto para evaluaciones cuantitativas como cualitativas de la dinámica de las especies vegetales cultivadas (Jiménez-Jiménez et al., 2022; Moro et al., 2022). Entre los índices de vegetación que podemos calcular se incluyen el NDVI, DVI, GNDVI y EVI2 utilizando las bandas espectrales de reflectancia en la banda verde (GREEN), reflectancia en la banda roja (RED) y reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR) (Tabla 3).

Tabla 3

*Índices de vegetación determinadas con las bandas GREEN, RED y NIR*

Índice de Vegetación	Modelo	Referencia
Índice de vegetación de diferencia normalizada	$NDVI = (NIR - RED / NIR + RED)$	(Rouse et al., 1973)
Índice de vegetación diferencial	$DVI = 2,4 (NIR - RED)$	(Jordan, 1969)
Índice de vegetación de diferencia normalizada verde	$GNDVI = \frac{(NIR - GREEN)}{(NIR + GREEN)}$	(Hunt et al., 2010)
Índice de vegetación mejorado 2	$EVI2 = 2,5 \frac{(NIR - RED)}{(NIR + 2,4 RED + 1)}$	(Jiang et al., 2008)

Nota: Algoritmos de los modelos de los índices de vegetación

## 4.5 PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE LA INFORMACIÓN

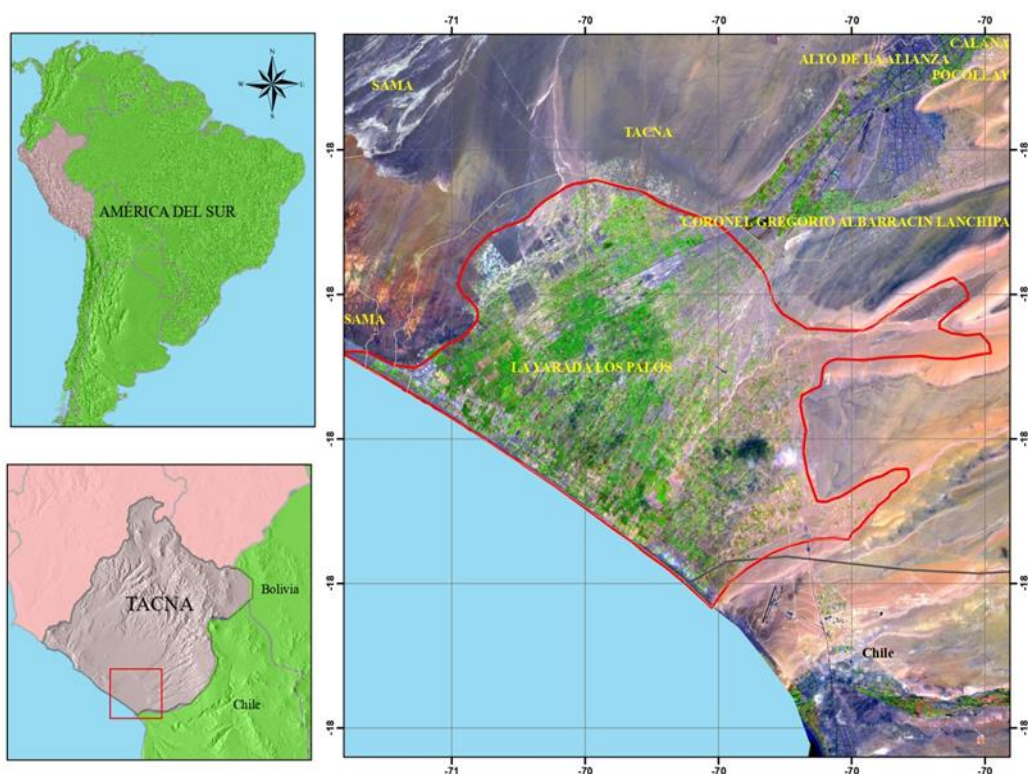
### 4.5.1 Delimitación del área de estudio

El área de estudio comprende La Yarada, ubicada en la región Tacna (Figura 1), en la cabecera del desierto de Atacama, en una zona hiperárido y cercano al mar, región limítrofe entre Perú y Chile. La región de Atacama ubicado en Chile es considera como uno de los principales desiertos del mundo (Stein et al., 2013), presenta un clima hiperárido con ausencia de lluvias, el cual se atribuye a su ubicación subtropical (Ashley M. Abrook et al., s. f.; Bartz et al., 2020)

La disponibilidad de recurso hídrico superficial en esta región es muy escasa tanto para uso poblacional y el riego de los cultivos (Pino-Vargas et al., 2021). El abastecimiento de agua para el riego de los cultivos y uso poblacional de esta zona es exclusivamente a través de aguas subterráneas. La cual proviene del denominado acuífero Caplina, la misma que almacena agua desde épocas remotas, el mismo que se encuentra en desbalance debido a la sobreexplotación desde la década de los 80 (Pino-Vargas et al., 2021) y actualmente se ha observado que la calidad del agua se ha deteriorado progresivamente a causa de la intrusión marina (Narvaez-Montoya et al., 2022; Pino V., 2019; Samuel Chucuya et al., s. f.).

Figura 1.

*Mapa de ubicación irrigación La Yarada*



Nota: Características de cobertura del área de estudio

#### 4.5.2 Procesamiento de la información de imágenes satelitales

El estudio se inicia con la recopilación de imágenes satelitales Landsat del repositorio Google Earth Engine (LANDSAT 5 y LANDSAT 8) de los años de estudio 1985-2021 (Tabla 4).

Tabla 4

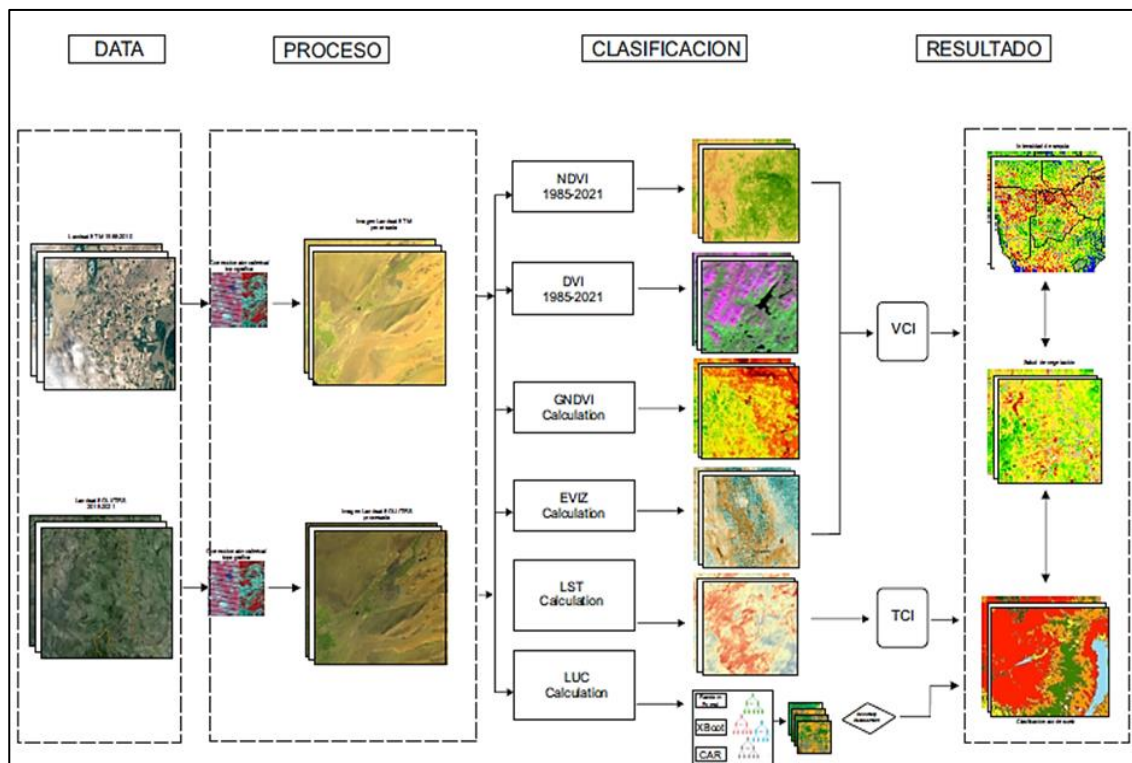
*Imágenes de satélites Landsat 5 y 8, identificador de producto, fecha y posición*

Datos	Año	Identificador de producto	Fecha	Parche	Fila
<b>Landsat 5</b>	1985	LT05_002072_19850328	1985/03/28	02	72
		LT05_002073_19850328	1985/03/28	02	73
	1990	LT05_002072_19900222	1990/02/22	02	72
		LT05_002072_19900310	1990/03/10	02	72
		LT05_002072_19900326	1990/03/22	02	72
		LT05_002073_19900121	1990/01/21	02	73
		2000	LT05_002073_20000321	2000/03/21	02
	2005	LT05_002072_20050319	2005/03/19	02	72
		LT05_002072_20050404	2005/04/04	02	72
		LT05_002072_20050420	2005/04/20	02	72
LT05_002073_20050319		2005/03/19	02	73	
2010	LT05_002073_20100216	2010/02/26	02	73	
<b>Landsat 8</b>	2015	LC08_002073_20150315	2015/03/15	02	73
	2021	LC08_002073_20210315	2021/03/15	02	73

Nota: Características de las imágenes satelitales utilizadas en el estudio

A continuación, se procede a la evaluación de las imágenes obtenidas de los años 1985 al 2021, teniendo en consideración las correcciones radiométrica, atmosférica y geométrica esto a nivel de reflectancia de la superficie terrestre (Figura 2); seguidamente se procede a la determinación de los índices de vegetación de NDVI, DVI, GNDVI y EVI2 esto mediante algoritmos específicos para cada índice, de igual forma se procede a determinar los índices de sequías como TCI, VCI y VHI; siempre considerando los análisis respectivos de cada periodo de evaluación en este caso se determinó índices de los años 1985 -2021 con intervalos de 5 años.

Figura 2.  
Diagrama de la metodología de trabajo



Nota: Detalle de los diferentes procesos según metodología de investigación

### 4.5.3 Caracterización del uso del territorio y cambio de uso de suelo

Las actividades humanas que implican cambios en el uso del suelo y la vegetación tienen impactos negativos en la biodiversidad y la capacidad de los ecosistemas para proporcionar servicios ecosistémicos (Baude et al., 2019). Además, desempeñan un papel significativo en los procesos de cambio climático a nivel regional. La climatología en la región norte del desierto de Atacama es altamente sensible a estos cambios (Bartz et al., 2020; Benedikt Ritter et al., 2019).

El cambio de uso/cobertura de la tierra (LUCC) es un indicador importante del impacto del cambio climático y la actividad humana. La Tabla 5 muestra los tipos de coberturas de uso de suelo que se han determinado, así como los componentes de cada uno de ellos, que son características típicas en el uso del suelo.

Tabla 5

*Tipos de uso y cobertura de suelo en el área de estudio*

Clases LUCC	Descripción
Superficie de agua	Tanque, reservorio, río etc.
Áreas urbanas	Construcciones urbanas y rurales, carreteras y estructuras de concreto
Área agrícola	Plantación agrícola, arbustos, bosques, etc.
Superficie de suelo desnudo	Suelo desnudo, superficies impermeables, etc.

Nota: Clasificación de cobertura y componentes de cada tipo

La clasificación supervisada requiere variables predictoras como datos de entrada. Utilizamos las bandas espectrales Landsat 5, Landsat 8, NDVI, NDBI y NDWI de imágenes satelitales para mejorar la capacidad predictiva del modelo.

En la determinación de los usos de suelo, aplicamos el uso de tres algoritmos como clasificadores de uso de suelo, Random Forest (RF), Extreme Gradient Boosting (XGBoost) y Classification and Regression Trees (CART), los cuales han sido aplicados en varios estudio durante los últimos años (Espinosa Zúñiga, 2020).

El RF, es un algoritmo con vigencia desde hace casi veinte años y es utilizadas en forma constante por el balance que ofrece entre su complejidad (Munir et al., 2023; Vergni & Todisco, 2023). Por otro lado, XGBoost es un algoritmo nuevo que ha ganado interés recientemente y ha despertado un gran interés, ya que la aparición de nuevos algoritmos tiende a crear avances significativos. A pesar de ser relativamente nuevo, gracias a los logros conseguidos hasta ahora, ya se reconoce el estado del arte en algoritmos de aprendizaje automático. (El Bilali et al., 2023). El CART, modelo que comprende a un árbol de decisión con un algoritmo de impulso (Qiao et al., 2023), y se realiza la clasificación supervisada, en comparación con el algoritmo de árbol de decisión convencional, este algoritmo de impulso actúa para acelerar el tiempo de procesamiento (Qiao et al., 2023; Zhao et al., 2021)

RF es un clasificador de conjunto que consta de árboles de decisión; clasifica por agregación de arranque, lo que da como resultado la producción de diferentes subconjuntos de entrenamiento y una variedad de árboles donde cada árbol proporciona

un resultado de clasificación para las muestras no elegidas. La optimización de hiperparámetros para Random Forest (RF) utilizando la función 'smileRandomForest' y la sintaxis del paquete 'Caret' es relativamente simple, ya que solo involucra dos hiperparámetros: (1) el número de árboles de decisión y (2) el número de variables aleatorias disponibles en cada nodo. La precisión tiende a aumentar con árboles de decisión adicionales, pero se estanca después de un punto. En general, un valor de 500 se considera más que suficiente para alcanzar esta meseta cuando se utilizan pocos datos de referencia con pocas clases (<10) y tamaños de muestra pequeños (<200). Optimizar el número de variables aleatorias también es relativamente simple, con valores que van desde 1 hasta el número de variables predictoras (que en este caso es el número de bandas multiplicado por el número de imágenes utilizadas en el conjunto de datos).

Los modelos con hiperparámetros optimizados se replicaron 50 veces para obtener valores medios y de desviación estándar para las estadísticas de precisión del modelo. Los modelos se entrenaron utilizando el 70 % de las muestras de cada clase, las muestras se seleccionaron aleatoriamente cada vez que se ejecutó el modelo y los predictores se escalaron y centraron antes de la clasificación. Se produjeron matrices de confusión para cada una de las réplicas usando el 30% restante de las muestras de cada clase.

### **Evaluación de precisión**

Los mapas de uso del suelo derivados de la clasificación de imágenes a menudo pueden contener errores. Por lo tanto, es importante validar la precisión de los resultados de la clasificación obtenida. La matriz de error/confusión es un método utilizado para evaluar la precisión de los resultados de la clasificación supervisada

Esta matriz compara la información obtenida por puntos de referencia con la proporcionada por la imagen clasificada en determinadas zonas de muestra de estudio. Los puntos de referencia de las imágenes Landsat de los años 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 y 2021 fueron obtenidos de la plataforma Google Earth Engine, de igual forma los diferentes índices como NDVI, acoplados a los juicios e interpretaciones. En las imágenes correspondientes a los años de estudio, se registraron puntos de referencia aleatorios en los diferentes tipos de cobertura de uso del suelo durante visitas de campo y se georreferenciaron mediante el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Del 100 %

de los puntos de referencia se utilizó el 30 % de los puntos de referencia para generar una matriz de error/confusión de referencia para los tipos de cobertura del suelo. Después, se calcularon la precisión del usuario, la precisión del productor, la precisión general y el coeficiente kappa de Cohen a partir de la matriz de confusión generada. Este estudio adoptó la ecuación (1) para el cálculo del coeficiente kappa.

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r X_{ij} - \sum_{i=1}^r X_{i+} X_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^r X_{i+} X_{+i}} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde se tiene: K corresponde al coeficiente kappa, r al número de filas y columnas de la matriz de error, N al número total de observaciones (píxeles),  $X_{ij}$  a la observación en las filas I y j,  $X_{i+}$  al marginal total de las filas I y  $X_{+i}$  al marginal total de las filas j.

Tabla 6.

*Observaciones de la concordancia para el coeficiente kappa*

Valor Kappa-Hat	Naturaleza del Acuerdo
$0,8 \leq k < 1$	muy buena congruencia
$0,61 \leq k < 0,8$	buena congruencia
$0,41 \leq k < 0,6$	moderada congruencia
$0,21 \leq k < 0,4$	escasa congruencia
$0,0 \leq k < 0,2$	ínfima congruencia
$k < 0,0$	mala

Nota: Categorías de validación de la clasificación según el coeficiente Kappa

#### 4.5.4 Temperatura superficial terrestre (LST)

El LST se ha procedido a la estimación mediante el uso de las observaciones de la banda del infrarrojo térmico de Landsat 5 y 8, de los cuales sólo Landsat 8 lleva dos bandas térmicas como ser la banda 10 y 11, mientras que Landsat 5 la banda 6 es la térmica. La Tabla 8 presenta el rango de longitud de onda y la resolución espacial de cada banda térmica Landsat, junto con el período de tiempo de operación. Para estimar la LST, se requiere información de emisividad superficial de fuentes externas.

La temperatura de la superficie terrestre se obtiene utilizando las emisividades y las temperaturas de brillo de la superficie. En el objetivo de evaluarlos como variables de cambio climático, se generaron mapas de temperatura de la superficie terrestre para los años de estudio. Utilizando la emisividad y la temperatura de brillo del sensor, se determinó la temperatura de la superficie mediante la ecuación (2). (Avdan & Jovanovska, 2016):

$$T_s = \frac{TB}{\{1 + [(\lambda * TB/\rho) * \ln \epsilon\lambda]\}} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

Ts: Temperatura del aire en grados Celsius.

TB: Temperatura de brillo de reflectancia.

$\lambda$ : Longitud de onda de la radiación emitida ( $\lambda = 10,895$ ).

$\epsilon\lambda$ : Emisividad de la superficie

$\rho$ : Constante

#### 4.5.5 Relación de cambio de uso de suelo y variabilidad climática

Para evaluar o determinar si existe alguna relación entre los valores medios de la distribución espacial de la variabilidad climática y el cambio de uso de suelo en la zona de estudio, se procedió a realizar un análisis estadístico, para tal efecto se procedió a analizar el cambio de uso de suelo (CUS) y la variabilidad climática (expresada por la variación de temperatura) en zona de estudio; se procedió a realizar las pruebas de hipótesis para la zona de estudio, en primer lugar aplicando la prueba de correlación bivariada para determinar la existencia de correlación entre las variables utilizadas y la probabilidad de error en la hipótesis del investigador; seguidamente conociendo este dato se procedió a realizar el análisis de regresión lineal para determinar el porcentaje de relación entre el comportamiento de las variables.

#### 4.5.6 Impacto de los cambios de suelo y temperatura sobre la vegetación

En las últimas décadas. Del crecimiento de los cambios de uso en el suelo y la cobertura del suelo, ha llevado a una enorme transformación en los patrones del paisaje global. Los cambios en el uso de la tierra contribuyeron a una reducción en la salud de la vegetación, también impulsa el cambio climático que afecta a los humanos y la vida de las especies.

El impacto de los usos del suelo debe analizarse considerando las siguientes preguntas ¿cómo podrían los cambios en el paisaje afectar las condiciones de temperatura de la superficie y de la tierra?, ¿cómo existe la relación entre los patrones de cambio de uso del suelo y los factores ambientales (temperatura, humedad y vegetación)?

Con la clasificación de uso de suelo, se procede a determinar el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI); a continuación, teniendo la información el NDVI y TLS, se procede a determinar los índices de vegetación TCI, VCI y VHI a nivel anual.

#### Índices de vegetación

Se cuentan con diversos índices de sequía que facilitan la supervisión de las condiciones de sequía, y cada uno de ellos tiene características particulares que los hacen adecuados para contextos específicos (Han et al., 2020). En este estudio se utilizaron tres índices de sequía ampliamente extendidos: el índice de condición de la temperatura (TCI), el índice de condición de la vegetación (VCI) y el índice de salud vegetal (VFI). En la tabla 7, se detallan los modelos matemáticos de los índices de vegetación.

Tabla 7

#### Índices de salud de la vegetación

Índice de sequía	Ecuación	Referencia
Condición de temperatura (TCI)	$TCI = \frac{LST_{max} - LST_i}{LST_{max} - LST_{min}}$	(Han et al., 2020)
Condición de vegetación (VCI)	$VCI = \frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$	(F. N. Kogan, 1995b)
Salud de la vegetación (VHI)	$VHI = \alpha TCI + \beta VCI$ $\alpha = 0,5, \quad \beta = 0,5$	(F. N. Kogan, 1997)

Nota: Se detalla los modelos de los índices de vegetación según los autores respectivos

### **Índice de Condición de Vegetación (VCI)**

Los cambios en el NDVI asociados a las condiciones meteorológicas son menores que los asociados a las características del ecosistema, por lo que los efectos de la sequía sobre la vegetación no son fáciles de discernir directamente a través de los datos del NDVI. Por lo tanto (Kogan, 1995b) creó el Índice de Estado de la Vegetación (VCI, por sus siglas en inglés) para evaluar las variaciones locales de la productividad de un ecosistema. El valor climático a corto plazo del NDVI separada de la señal ecológica a largo plazo por el VCI, que es una normalización del NDVI a nivel de píxeles. Bajos valores en las observaciones de NDVI a lo largo de varios años se refleja en una sequía extrema que disminuye el crecimiento de la vegetación en una estación y región climática determinadas. Sin embargo, para evaluar el impacto de la sequía en la vegetación, el VCI es un indicador más preciso que el NDVI.

### **Índice de Condición de Temperatura (TCI)**

Durante una sequía, la superficie del suelo puede experimentar estrés térmico. Por lo tanto, se propone el Índice de Condición de Temperatura (TCI), que es un indicador del estrés térmico y su relación con el fenómeno de sequía (Kogan, 1995a). Este índice parte del supuesto de que el evento de sequía conlleva una disminución de la humedad en el suelo, lo que provoca estrés térmico en la superficie del suelo. El algoritmo del TCI es similar al del VCI, y se estima en función de una serie de tiempo la temperatura mínima y máxima del suelo. Sin embargo, a diferencia del NDVI, un valor alto de la Temperatura de Superficie de la Tierra (LST) en la vegetación indica condiciones desfavorables de sequía, mientras que un valor bajo de LST refleja condiciones favorables (Singh et al., 2022).

### **El índice de salud de la vegetación (VHI)**

Es uno de los índices más populares de monitoreo de sequías por sensores remotos, indica el estrés de la vegetación causado por factores climáticos e hidrológicos (Kogan, 1995a). El VHI está compuesto por la relación de los índices VCI y TCI, el cuál considera las condiciones biofísicas y climáticas locales, y puede usarse para el monitoreo real de la sequía en regiones agrometeorológicas. Los principios básicos del VHI son los siguientes: (1) un índice de vegetación de diferencias normalizadas Bajo y una temperatura de la

superficie terrestre Alta, las cuales sugieren una mala salud de la vegetación; y (2) se supone que las contribuciones de VCI y TCI a VHI son iguales, ya que no hay datos sobre las contribuciones relativas de otras condiciones a la salud de la vegetación. Sin embargo, las contribuciones de TCI y VCI a VHI dependen del clima y otros factores ambientales. De hecho, las condiciones ambientales en diferentes regiones suelen ser diferentes, lo que implica que otorgar pesos iguales a VCI y TCI puede reducir las perspectivas de aplicación del VHI, aumentando la incertidumbre en la detección de sequías.

Zhang et al., (2017), Zhang et al. (2017), después de realizar un estudio exhaustivo de varios índices de sequía, han propuesto una clasificación para estos índices. Siguiendo las pautas de su estudio, hemos asignado los valores de clasificación según detalle plasmado en la Tabla 8.

Tabla 8

*Rangos de categorización de los índices de vegetación*

<b>Descripción</b>	<b>TCI</b>	<b>VCI</b>	<b>VHI</b>
Sequía extrema	0 – 0,1	0 – 0,1	0 – 0,1
Sequía grave	0,1 – 0,2	0,1 – 0,2	0,1 – 0,2
Sequía moderada	0,2 – 0,3	0,2 – 0,3	0,2 – 0,3
Sequía leve	0,3 – 0,4	0,3 – 0,4	0,3 – 0,4
Sequía anormal	0,4 – 0,5	0,4 – 0,5	
Sin sequía	0,5 - 1	0,5 - 1	0,4 - 1

Nota: Se detalla la escala de clasificación de los índices de a nivel de tipo y rango

## **CAPÍTULO V**

### **RESULTADOS**

#### **5.1 CAMBIO DE USO DEL SUELO**

En la zona de estudio, el uso del territorio para el año 1985 sólo se ha clasificado en las coberturas más representativas de la zona como ser área agrícola y suelo desnudo o tierras sin cultivo, las demás coberturas como recurso hídrico, zona urbana no fueron considerados por su poca extensión, los algoritmos y la imagen satelital Landsat no permiten una clasificación representativa, por lo cual sólo se enfocó a evaluar las dos coberturas de mayor importancia.

##### **5.1.1 Uso del territorio para diferentes años**

###### **Uso del suelo para el año 1985**

Para el año 1985, el uso del suelo (Tabla 9 y Figura 3) se distribuye de la siguiente manera: el tipo de uso de suelo con mayor área ocupada es suelo desnudo con 51 153,3 ha, lo que representa un 89,6 % del territorio, seguido por área agrícola con 5 961,0 ha, que representa un 10,4 % del área total. Los cultivos predominantes en la zona son de tipo permanente, como el olivo, y los cultivos transitorios y semipermanentes están en menor proporción.

Tabla 9

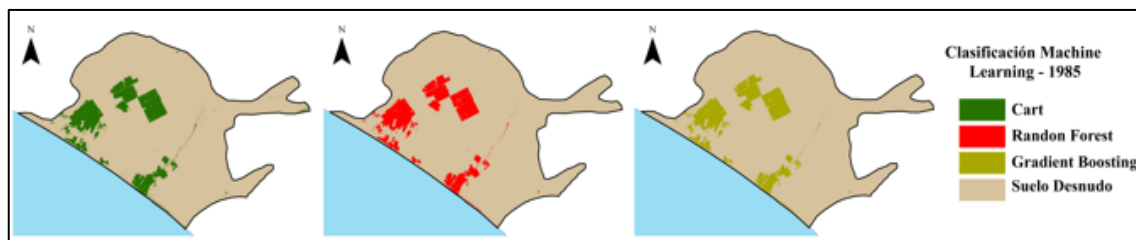
*Uso del suelo para el año 1985*

<b>Categoría LUCC</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Área agrícola	5961,0	10,4
Área de suelo desnudo	51151,3	89,6

Nota: El cuadro muestra las áreas y porcentaje de los tipos de cobertura durante el año 1985

Figura 3.

*Mapa del uso del suelo en 1985.*



Nota: En el mapa se observa la ubicación de las coberturas según modelos de clasificación, año 1985

### Uso del suelo para el año 1990

En relación al año 1990, la distribución del uso del suelo en el área de estudio (Tabla 10 y Figura 4) es como se describe: el tipo de uso de suelo con mayor área ocupada es suelo desnudo con 51 098,9 ha, lo que representa un 89,4 % del territorio, seguido por área agrícola con 6 043,4 ha, representando un 10,6 % del área total. Los cultivos predominantes en la zona son de tipo permanente, como el olivo, y los cultivos transitorios y semipermanentes están en menor proporción.

Tabla 10

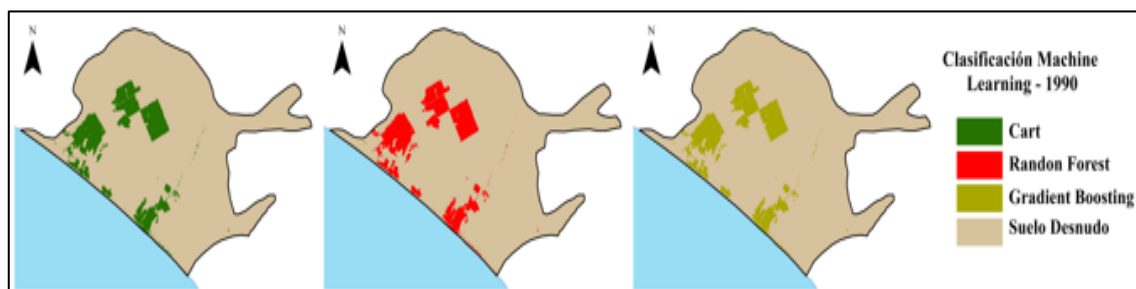
*Uso del suelo para el año 1990*

Categoría LUCC	Área (ha)	Porcentaje (%)
Área agrícola	6043,4	10,6
Área de suelo desnudo	51068,9	89,4

Nota: El cuadro muestra las áreas y porcentaje de los tipos de cobertura durante el año 1990

Figura 4.

*Mapa del uso del suelo en 1990*



Nota: En el mapa se observa la ubicación de las coberturas según modelos de clasificación, año 1990

### Uso del suelo para el año 1995

En relación al año 1995, la distribución del uso del suelo en el área de estudio (Tabla 11 y Figura 5) es como se describe: el tipo de uso de suelo con mayor área ocupada es suelo desnudo, con 50 628,03 ha, lo que representa un 88,6 % del territorio, seguido por área agrícola con 6 484,3 ha, representando el 11,4 % del área total. Los cultivos predominantes en la zona son de tipo permanente, como el olivo, y los cultivos transitorios y semipermanentes están en menor proporción

Tabla 11

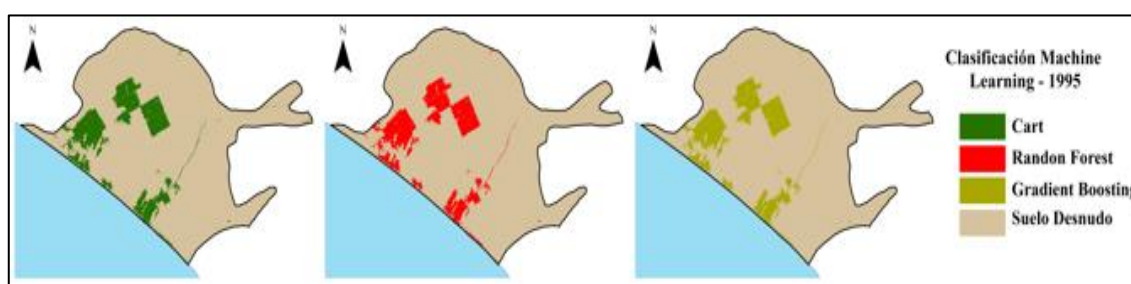
*Uso del suelo para el año 1995*

Categoría LUCC	Área (ha)	Porcentaje (%)
Área agrícola	6484,3	11,4
Área de suelo desnudo	50628,0	88,6

Nota: El cuadro muestra las áreas y porcentaje de los tipos de cobertura durante el año 1995

Figura 5

*Mapa del uso del suelo en 1995*



Nota: En el mapa se observa la ubicación de las coberturas según modelos de clasificación, año 1995

### Uso del suelo para el año 2000

En relación al año 2000, la distribución del uso del suelo en el área de estudio (Tabla 12 y Figura 6) es como se describe: el tipo de uso de suelo con mayor área ocupada es suelo desnudo con 48 972,4 ha, lo que representa un 85,7 %, seguido por área agrícola con 8139,9 ha, representando el 14,3 % del área total. Los cultivos predominantes en la zona

son de tipo permanente, como el olivo, y los cultivos transitorios y semipermanentes están en menor proporción.

Tabla 12

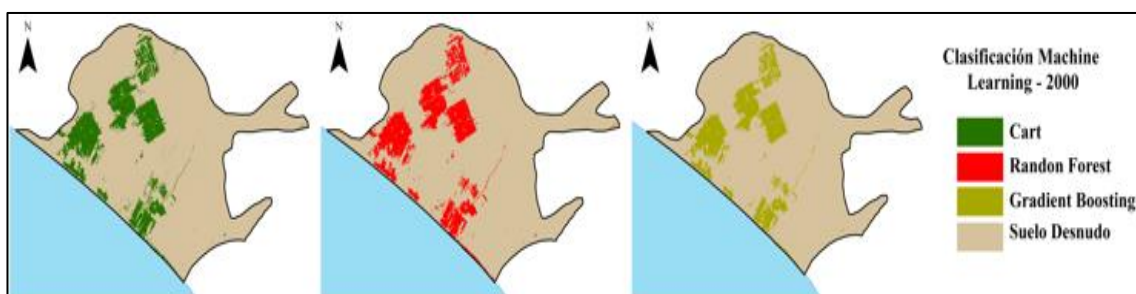
*Uso del suelo para el año 2000*

Categoría LUCC	Área (ha)	Porcentaje (%)
Área agrícola	8139,9	14,3
Área de suelo desnudo	48972,4	85,7

Nota: El cuadro muestra las áreas y porcentaje de los tipos de cobertura durante el año 2000

Figura 6

*Mapa del uso del suelo en 2000*



Nota: En el mapa se observa la ubicación de las coberturas según modelos de clasificación, año 2000

### Uso del suelo para el año 2005

En relación al año 2005, la distribución del uso del suelo en el área de estudio (Tabla 13 y Figura 7) es como se describe: el tipo de uso de suelo con mayor área ocupada es suelo desnudo con 46 271,9 ha, lo que representa un 81,0 %, seguido por área agrícola con 10840.4 ha, representando el 19,0 % del área total. Los cultivos predominantes en la zona son de tipo permanente, como el olivo, y los cultivos transitorios y semipermanentes están en menor proporción.

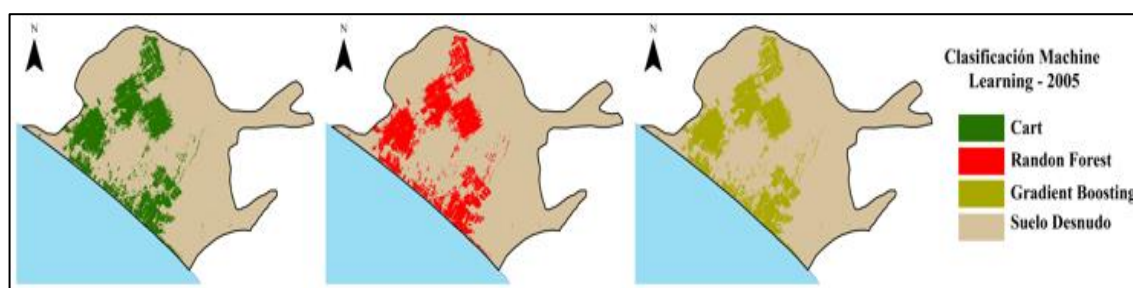
Tabla 13

*Uso del suelo para el año 2005*

Categoría LUCC	Área (ha)	Porcentaje (%)
Área agrícola	10840,4	19,0
Área de suelo desnudo	46271,9	81,0

Nota: El cuadro muestra las áreas y porcentaje de los tipos de cobertura durante el año 2005

Figura 7

*Mapa del uso del suelo en 2005*

Nota: En el mapa se observa la ubicación de las coberturas según modelos de clasificación, año 2005

**Uso del suelo para el año 2010**

En relación al año 2010, la distribución del uso del suelo en el área de estudio (Tabla 14 y Figura 8) es como se describe: el tipo de uso de suelo con mayor área ocupada es suelo desnudo con 46 451,3 ha, lo que representa un 81,3 %, seguido por área agrícola con 10661,0 ha, representando el 18,7 % del área total. Los cultivos predominantes en la zona son de tipo permanente, como el olivo, y los cultivos transitorios y semipermanentes están en menor proporción.

Tabla 14

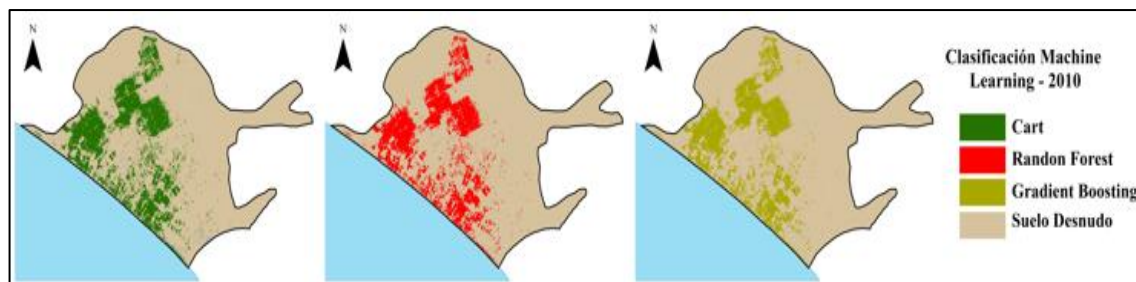
*Uso del suelo para el año 2010*

Categoría LUCC	Área (ha)	Porcentaje (%)
Área agrícola	10661,0	18,7
Área de suelo desnudo	46451,3	81,3

Nota: El cuadro muestra las áreas y porcentaje de los tipos de cobertura durante el año 2010

Figura 8.

*Mapa del uso del suelo en 2010.*



Nota: En el mapa se observa la ubicación de las coberturas según modelos de clasificación, año 2010

### Uso del suelo para el año 2015

En relación al año 2015, la distribución del uso del suelo en el área de estudio (Tabla 15 y Figura 9) es como se describe: el tipo de uso de suelo con mayor área ocupada es suelo desnudo con 38 076,4 ha, representando el 66,7 %, seguido por área agrícola con 19 035,9 ha, que representa un 33,3 % del área total. Los cultivos predominantes en la zona son de tipo permanente, como el olivo, y los cultivos transitorios y semipermanentes están en menor proporción.

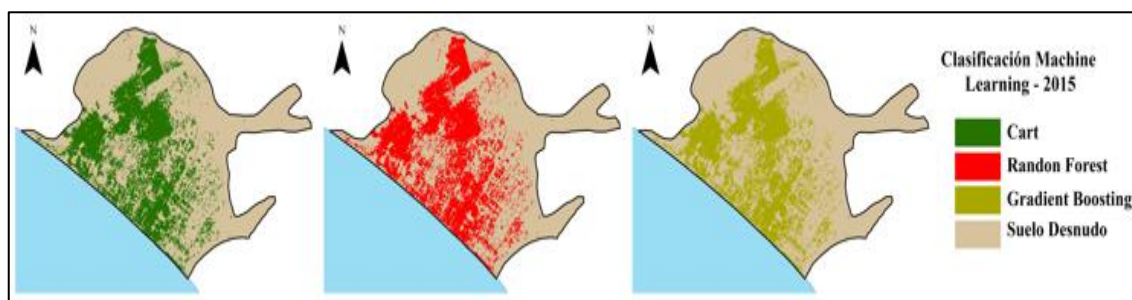
Tabla 15

*Uso del suelo para el año 2015*

Categoría LUCC	Área (ha)	Porcentaje (%)
Área agrícola	19 035,9	33,3
Área de suelo desnudo	38 076,4	66,7

Nota: El cuadro muestra las áreas y porcentaje de los tipos de cobertura durante el año 2015

Figura 9

*Mapa del uso del suelo en 2015*

Nota: En el mapa se observa la ubicación de las coberturas según modelos de clasificación, año 2015

**Uso del suelo para el año 2021**

En relación al año 2021, la distribución del uso del suelo en el área de estudio (Tabla 16 y Figura 10) es como se describe: el tipo de uso de suelo con mayor área ocupada es suelo desnudo con 28 343,9 ha, lo que representa un 50,4 %, seguido por área agrícola con 28 343,9 ha, representando el 49,6 % del área total. Los cultivos predominantes en la zona son de tipo permanente, como el olivo, y los cultivos transitorios y semipermanentes están en menor proporción.

Tabla 16

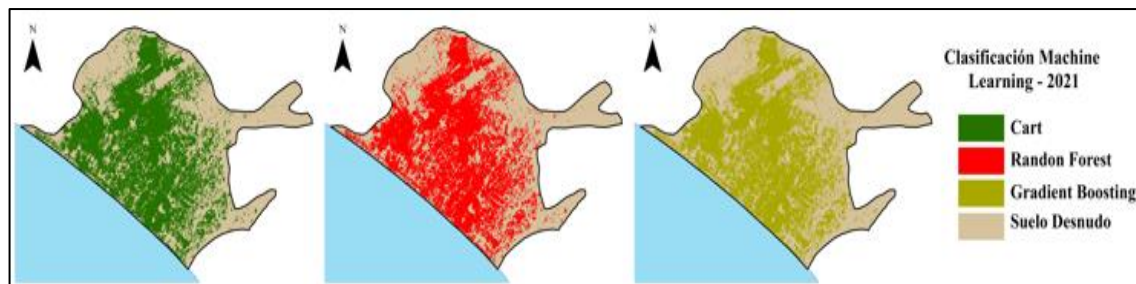
*Uso del suelo para el año 2021*

Categoría LUCC	Área (ha)	Porcentaje (%)
Área agrícola	28343,9	49,6
Área de suelo desnudo	28768,4	50,4

Nota: El cuadro muestra las áreas y porcentaje de los tipos de cobertura durante el año 2021

Figura 10.

*Mapa del uso del suelo en 2021.*



Nota: En el mapa se observa la ubicación de las coberturas según modelos de clasificación, año 2021

### Validación de la precisión de uso de suelo, modelo de supervisión clasificada

La evaluación de la precisión del modelo de clasificación supervisada de cambio y uso de suelo ha sido analizada con la ayuda del coeficiente de Kappa, la cual consiste en relacionar las coincidencias de los puntos de entrenamiento de los tipos de cobertura con pixeles clasificados por los modelos de la clasificación supervisada (Random Forest) obteniéndose los siguientes resultados para uso de suelo de 1985 el valor de kappa es 1, para el año 1990 el valor de kappa fue de 1, para el año 1995 el valor de kappa es 1, para el año 2000 el valor de kappa es 0,98, para el año 2005 el valor es 1, para el año 2010 el valor de kappa es 0,98, para el año 2015 el valor de kappa es 0,99 y para el año 2021 el valor de kappa es 0,99 (Tabla 17), lo cual significa que tanto el uso de suelo como la clasificación de la cobertura de la tierra pueden interpretarse como casi perfecto, determinad uso de suelo.

Tabla 17

*Evaluación de la precisión del uso del suelo y la cobertura entre 1985 y 2021*

Año	Cobertura	Área agrícola	Suelo desnudo	Agua	Total	Usuario precisión	Coefficiente Kappa (k)
1985	Área agrícola	115	0		115	100	1
	Suelo desnudo	0	1116		1116	100	
	Total	115	1116		1231		
	Precisión del productor	100	100		200		
	<b>Precisión general</b>				<b>1</b>		
1990	Área agrícola	106	0		106	100	1
	Suelo desnudo	0	1134		1134	100	

	Total	106	1134	1240		
	Precisión del productor	100	100	200		
	<b>Precisión general</b>			<b>1</b>		
<b>1995</b>	Área agrícola	133	0	133	100	
	Suelo desnudo	0	1352	1352	100	
	Total	133	1352	1485		<b>1</b>
	Precisión del productor	100	100	200		
	<b>Precisión general</b>			<b>0,99</b>		
<b>2000</b>	Área agrícola	142	2	144	100	
	Suelo desnudo	0	1304	1304	99	
	Total	142	1306	1448		<b>0,99</b>
	Precisión del productor	99	100	199		
	<b>Precisión general</b>			<b>1</b>		
<b>2005</b>	Área agrícola	212	0	212	100	
	Suelo desnudo	0	1708	1708	100	
	Total	212	1708	1920		<b>1</b>
	Precisión del productor	100	100	200		
	<b>Precisión general</b>			<b>1</b>		
<b>2010</b>	Área agrícola	207	0	0	207	100
	Suelo desnudo	0	1369	0	1369	99
	Agua	0	4	7	11	100
	Total	207	1373	7	1587	
	Precisión del productor	100	100	64	264	
	<b>Precisión general</b>			<b>0,99</b>		<b>0,98</b>
<b>2015</b>	Área agrícola	757	0	0	757	100
	Suelo desnudo	0	740	1	741	99
	Agua	0	2	6	8	86
	Total	757	742	7	1485	
	Precisión del productor	100	99	75	285	
	<b>Precisión general</b>			<b>0,99</b>		<b>0,99</b>
<b>2021</b>	Área agrícola	800	0	0	800	100
	Suelo desnudo	0	1211	0	1211	99
	Agua	0	8	8	16	100
	Total	800	1219	8	2027	
	Precisión del productor	100	100	50	200	
	<b>Precisión general</b>			<b>0,99</b>		<b>0,99</b>

Nota: Se observa los resultados de las pruebas de validación de la clasificación de coberturas

### Uso del suelo para el año 1985 - 2021

En resumen, el comportamiento de las coberturas de suelo durante el periodo de estudio (Tabla 18 y Figura 11) se observa un crecimiento de la cobertura de área agrícola durante los años 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2015 y 2021, mientras que el año 2010 se observa una reducción del área agrícola con relación al año 2005; el crecimiento de la cobertura de área agrícola varió de 5961,0 ha (1985) hasta 2 8343,9 ha., y el área de suelo desnudo tiende a disminuir de 51 1151,3 ha. (1985), hasta 28 768,4 ha. (2021).

Tabla 18

#### *Uso del suelo para el año 1985 – 2021*

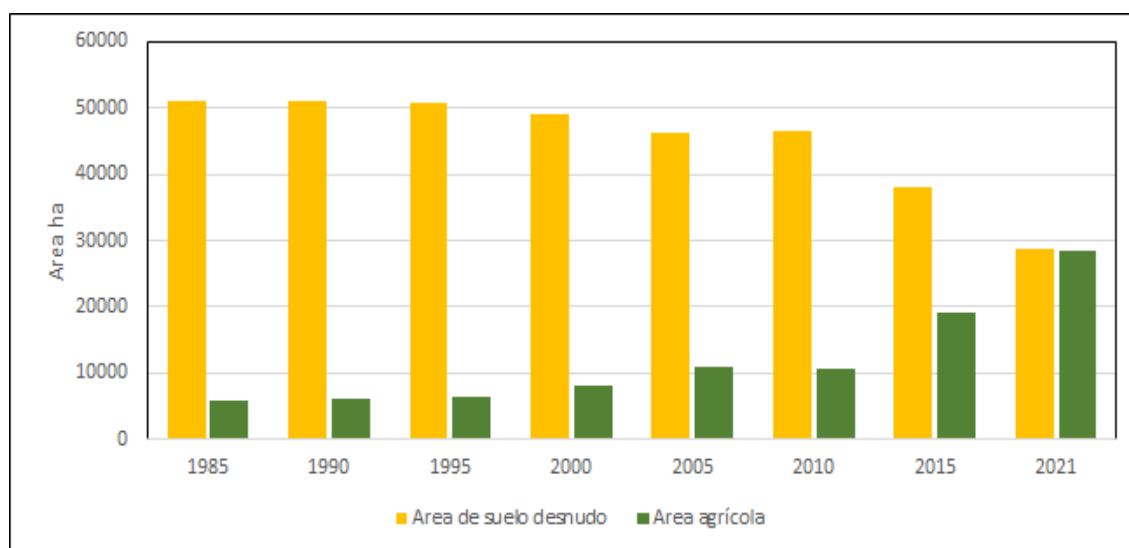
Categoría LUCC	Área (ha)							
	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2021
Área agrícola	5961,0	6043,4	6484,3	8139,9	10840,4	10661,0	19035,9	28343,9
Área de suelo desnudo	51151,3	51068,9	50628,0	48972,4	46271,9	46451,3	38076,4	28768,4

Nota: Se detalla las áreas de los usos de suelo determinados durante los años de estudio 1985-2021

En resumen, el comportamiento de las coberturas de suelo durante el periodo de estudio (Figura 11) se observa un crecimiento de la cobertura de área agrícola.

Figura 11

#### *Comportamiento del cambio de uso de suelo durante los años de estudio*



Nota: Se observa el comportamiento de los tipos de cobertura durante los años de estudio 1985-2021

### 5.1.2 Cambio de uso del suelo

Con los usos de suelo caracterizados para cada año, la comparación de la variación de las distintas coberturas se hizo superponiendo mapas temáticos.

#### ➤ Cambio de uso período 1985 – 1990

Durante este período de tiempo se caracteriza por el siguiente cambio: suelo desnudo a suelo con cobertura agrícola en un total de 82,4 ha. lo que representa el 0,14 % del área total de la zona de estudio (Tabla 19).

Tabla 19

*Cambio de uso del suelo período 1985 - 1990*

Cambio de uso	Área (ha)	Porcentaje (%)
Con cambio de uso	82,4	0,14
Sin cambio de uso	57194,7	99,9
<b>Total</b>	<b>57277,1</b>	<b>100,0</b>

Nota: El cuadro se muestra las áreas y porcentaje de los cambios de uso de suelo y sin cambio de uso

#### ➤ Cambio de uso período 1990 – 1995

Durante este período de tiempo se caracteriza por el siguiente cambio: suelo desnudo a suelo con cobertura agrícola en un total de 440,9 ha., lo que representa el 0,8 % del área total de la zona de estudio (Tabla 20).

Tabla 20

*Cambio de uso del suelo período 1990 - 1995*

Cambio de uso	Área (ha)	Porcentaje (%)
Con cambio de uso	440,9	0,8
Sin cambio de uso	56671,4	99,2
<b>Total</b>	<b>57112,3</b>	<b>100,0</b>

Nota: El cuadro se muestra las áreas y porcentaje de los cambios de uso de suelo y sin cambio de uso

➤ **Cambio de uso período 1995 – 2000**

Durante este período de tiempo se caracteriza por el siguiente cambio: suelo desnudo a suelo con cobertura agrícola en un total de 1 655,6 ha., lo que representa el 2,9 % del área total de la zona de estudio (Tabla 21).

Tabla 21

*Cambio de uso del suelo período 1995 – 2000*

<b>Cambio de uso</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Con cambio de uso	1655,6	2,9
Sin cambio de uso	55456,7	97,1
<b>Total</b>	<b>57112,3</b>	<b>100,0</b>

Nota: El cuadro se muestra las áreas y porcentaje de los cambios de uso de suelo y sin cambio de uso

➤ **Cambio de uso período 2000 – 2005**

Durante este período de tiempo se caracteriza por el siguiente cambio: suelo desnudo a suelo con cobertura agrícola en un total de 2 700,5 ha., lo que representa el 4,7 % del área total de la zona de estudio (Tabla 22).

Tabla 22

*Cambio de uso del suelo período 2000 – 2005*

<b>Cambio de uso</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Con cambio de uso	2700,5	4,7
Sin cambio de uso	54411,8	95,3
<b>Total</b>	<b>57112,3</b>	<b>100,0</b>

Nota: El cuadro se muestra las áreas y porcentaje de los cambios de uso de suelo y sin cambio de uso

➤ **Cambio de uso período 2005 – 2010**

Durante este período de tiempo se caracteriza por el siguiente cambio: suelo desnudo a suelo con cobertura agrícola en un total de 179,4 ha., lo que representa el 0,3 % del área total de la zona de estudio (Tabla 23).

Tabla 23

*Cambio de uso total para el período 2005 – 2010*

<b>Cambio de uso</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Con cambio de uso	179,4	0,3
Sin cambio de uso	56932,9	99,7
<b>Total</b>	<b>57112,3</b>	<b>100,0</b>

Nota: El cuadro se muestra las áreas y porcentaje de los cambios de uso de suelo y sin cambio de uso

#### ➤ **Cambio de uso período 2010 – 2015**

Durante este período de tiempo se caracteriza por el siguiente cambio: suelo desnudo a suelo con cobertura agrícola en un total de 8 374,9 hectáreas, lo que representa el 14,6 % del área total de la zona de estudio (Tabla 24).

Tabla 24

*Cambio de uso del suelo período 2010 – 2015*

<b>Cambio de uso</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Con cambio de uso	8374,9	14,6
Sin cambio de uso	48737,4	85,4
<b>Total</b>	<b>57112,3</b>	<b>100,0</b>

Nota: El cuadro se muestra las áreas y porcentaje de los cambios de uso de suelo y sin cambio de uso

#### ➤ **Cambio de uso período 2015 – 2021**

Durante este período de tiempo se caracteriza por el siguiente cambio: suelo desnudo a suelo con cobertura agrícola en un total de 9 308,0 ha., lo que representa el 16,3 % del área total de la zona de estudio (Tabla 25).

Tabla 25

*Cambio de uso del suelo período 2015 – 2021*

<b>Cambio de uso</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Con cambio de uso	9308,0	16,3
Sin cambio de uso	47804,3	83,7
<b>Total</b>	<b>57112,3</b>	<b>100,0</b>

Nota: El cuadro se muestra las áreas y porcentaje de los cambios de uso de suelo y sin cambio de uso

➤ **Cambio de uso período 1985-2021**

De igual forma, se realizó el análisis de cambio de uso de suelo de todo el período, tomándose como año inicial 1985 y final 2021. Durante el período 1985 - 2021 (Tabla 26 y Figura 12), el área de estudio registró cambio de uso de suelo total de 22 741,7 ha., que equivale al 39,7 % del área total y sin cambio de uso un total de 34 370,6 ha., lo que representa el 60,3 %; asimismo, se observa que durante los años 2015 y 2021 los cambios de uso de suelo fueron los más significativos con totales de 8 374,9 ha. y 9 308,0 ha., mientras que los años 1990 y 2010 fueron los periodos con menos cambios de uso de suelo con totales de 82,4 ha. y 179,4 ha. respectivamente. |

Tabla 26

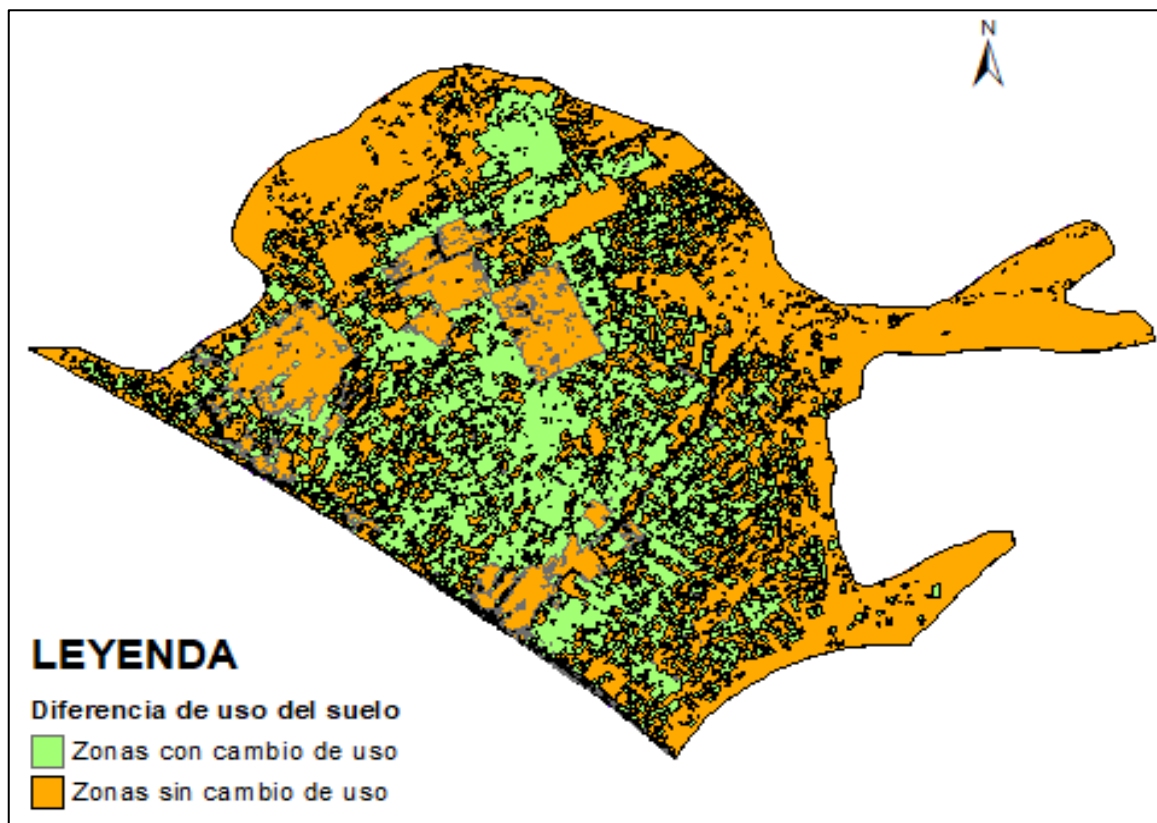
*Área total de cambio de uso de suelo y sin cambio de uso período 1985-2021*

<b>Cambio de uso</b>	<b>Área (ha)</b>								<b>Total</b>	<b>%</b>
	<b>1985</b>	<b>1990</b>	<b>1995</b>	<b>2000</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>	<b>2015</b>	<b>2021</b>		
Con cambio de uso	0,0	82,4	440,9	1655,6	2700,5	179,4	8374,9	9308,0	<b>22741,7</b>	<b>39,7</b>
Sin cambio de uso	57112,3	57194,7	56671,4	55456,7	54411,8	56932,9	48737,4	47804,3	<b>34370,6</b>	<b>60,3</b>
<b>Área total</b>									<b>57112,3</b>	<b>100</b>

Nota: Se detalla las áreas de los cambios de uso y sin cambio de uso de suelo determinados durante 1985-2021

Figura 12.

*Cambio de uso de suelo durante el periodo 1985-2021.*



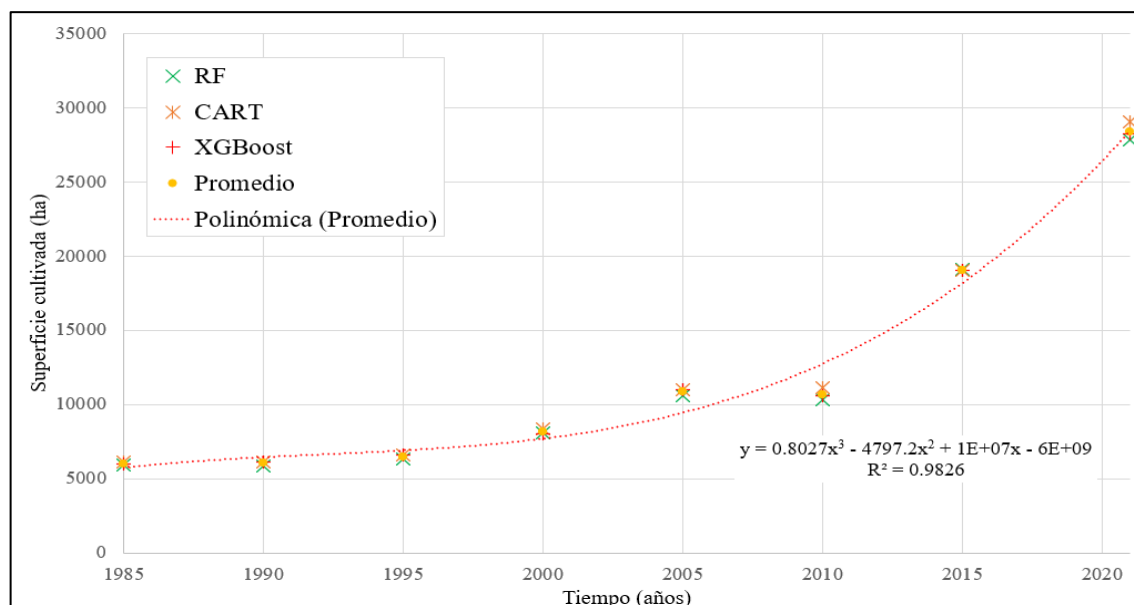
Nota: En el mapa se observa las áreas de cambio de uso de suelo y áreas sin cambio de uso 1985-2021

### 5.1.3 Tendencia de cambio de uso de suelo: superficie cultivada

En la Figura 13 se observa la proyección del área de uso de suelo con cultivo donde se observa un crecimiento continuo de los modelos utilizados en la determinación de uso de suelo, como los algoritmos RF, CART y XGBoost, estadísticamente no presentan diferencias significativas en relación a los cambios de uso, por lo que hemos establecido un solo modelo de tendencia promedio para este registro. Se tiene que los resultados muestran una tendencia creciente en relación al tipo de uso de suelo agrícola para el periodo 1985 a 2021.

Figura 13

*Tendencia de la superficie agrícola, modelos ML, RF, CART y XGBoost, para el periodo 1985 a 2021*



Nota: El gráfico presenta la distribución de áreas de cobertura según modelo de clasificación y periodo de estudio

## TASA DE CAMBIO DE USO

Finalmente, con los datos de cobertura y cambio de uso se procede a determinar la tasa de cambio de las unidades de cobertura (Tabla 27), del análisis se tiene el área agrícola presenta una tasa de cambio positiva de 4,4 % anual, mientras que área de suelo desnudo presenta una tasa de cambio negativo de -1,6 % anual; estos resultados muestran el crecimiento continuo de la frontera agrícola en la zona de estudio conllevando el incremento continuo de la extracción del recurso hídrico del acuífero La Yarada.

Tabla 27

*Tasa de cambio por unidad de cobertura 1985-2021*

UNIDAD	Área de cobertura (ha)		Tasa de cambio (%)	Porcentajes de cambio	
	2021	1985		2021	1985
Área agrícola	28343,9	5961,0	4,4	49,6	10,4
Área de suelo desnudo	28768,4	51151,3	-1,6	50,4	89,6

Nota: Se detalla la tasa de cambio de las coberturas de uso de suelo y los porcentajes de cambio periodo 1985-2021

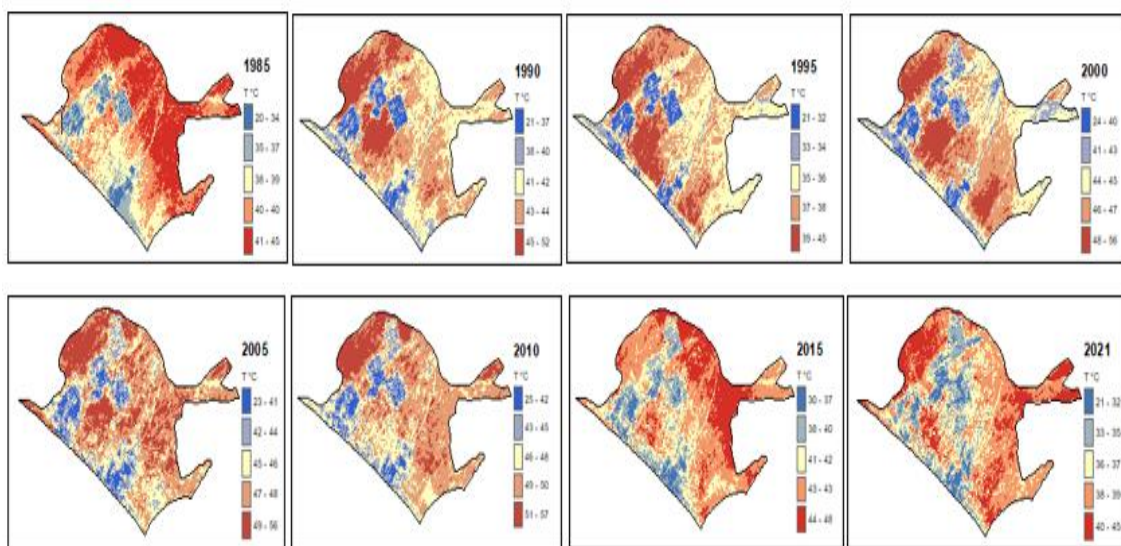
## 5.2 VARIABILIDAD CLIMATICA

Para la caracterización climática de la zona de estudio, dado el nivel de información de teledetección que se viene utilizando, y que en la zona de estudio solo se cuenta con sólo una estación, se determinó evaluar la variabilidad climática con la Temperatura Superficial Terrestre (LST), dado que es la variable climatológica representativa de la zona árida; Para estimar el LST nos basamos en las observaciones infrarrojas térmicas de Landsat, para lo cual se requiere de información de emisividad superficial de fuentes externas.

En la Figura 14, se muestra la distribución espacial del LST para el periodo 1985-2021, donde se observa que durante los años 1985, 1990, 1995 y 2021 presenta valores bajos de temperatura cuyos rangos varían de 20 °C a 40 °C, mientras que los años 2000, 2005, 2010 y 2015 presentan valores altos cuyos rangos varían de 24 °C a 50 °C; de igual forma se observa que en las áreas con cobertura vegetal presentan temperaturas bajas en relación a las áreas de sin cobertura o suelo desnudo donde se registran las temperaturas más altas. El año 2010 se observa que es al año con las temperaturas más altas con valores que fluctúan de 25 °C a 57 °C, mientras que el año 1985 presenta temperaturas más bajas cuyos valores fluctúan entre 20 °C a 45 °C.

Figura 14.

*Mapas Temperatura superficial terrestre zona de estudio años 1985 a 2021.*



Nota: En el mapa se observa la distribución de la temperatura de superficie terrestre en el área de estudio, según años

El análisis de los datos cuantitativos de los píxeles en el área de estudio del LST, según (Tabla 28 y Figura 15) se observa que durante los años 1985, 1990 y 1995 presentan los valores más bajo durante el periodo de estudio con valores medios de 25 °C a 28 °C; mientras que los años 2000, 2005, 2010, 2015 y 2021 presentas temperaturas altas durante el periodo de estudio con valores medios de 29 °C a 34 °C; de igual forma se observa una tendencia de incremento de la temperatura desde durante el periodo de estudio con valores medios de 25 °C el año 1985 hasta valores máximos medios de 34 °C el año 2010.

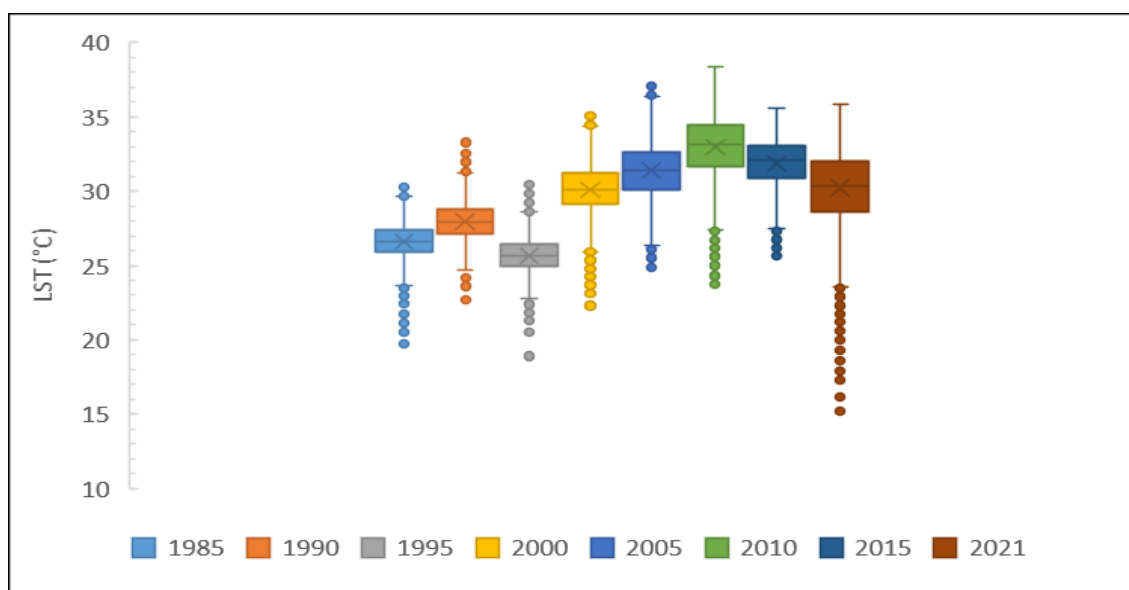
Tabla 28

*Estadísticas TST para el periodo de estudio*

<b>Estadístico TST</b>	<b>1985</b>	<b>1990</b>	<b>1995</b>	<b>2000</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>	<b>2015</b>	<b>2021</b>
Datos	19811	19811	19811	19811	19811	19811	19811	19811
Media	26,6	28,0	25,6	30,1	31,4	33,0	31,8	30,2
Mínimo	19,7	22,7	18,9	22,3	24,9	23,7	25,6	15,2
25%	25,9	27,2	25,0	29,1	30,1	31,6	30,8	28,6
50%	26,6	27,9	25,6	30,1	31,4	33,2	32,1	30,3
75%	27,4	28,8	26,4	31,2	32,6	34,5	33,1	32,0
Máximo	30,5	33,3	30,6	35,5	37,1	38,4	35,6	35,9

Nota: Resumen estadístico de la temperatura de superficie terrestre, periodo 1985 - 2021

Figura 15.

*Diagrama de caja y bigotes de Temperatura superficial terrestre*

Nota: En el gráfico se visualiza la distribución, tendencia central y cuartiles de temperatura superficial

## ANÁLISIS DE TENDENCIA DE LA TEMPERATURA

Se realizó el análisis de la tendencia de la temperatura TST con relación a los años de estudio, esto mediante un análisis estadístico de regresión lineal.

Se realizó la prueba de correlación bivariada (Tabla 29) encontrándose: que, con una probabilidad de error de 3,2 % el cambio de uso de suelo está correlacionado con el cambio de la temperatura media.

Tabla 29

### *Prueba de correlación bivariada de TST*

		Temperatura media	Año
Temperatura media	Correlación de Pearson	1	0,750
	Sig (bilateral)		0,032
N		7	

Nota: La tabla muestra el p valor para la relación entre las variables temperatura y años de estudio durante el periodo 1985-2021

Del análisis de regresión lineal (Tabla 30), la bondad de ajuste ( $R^2$ ) indica que la variación de la temperatura media esta explicada por la variación de año en 56,3 %, y de acuerdo al coeficiente de correlación de Pearson entre dos variables ( $R$ ): entre la temperatura media y los años ( $R = 0,750$ ) existe un alto grado de correlación significativa.

Tabla 30

### *Resumen del modelo de TST*

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error tip. De la estimación
1	0,750	56,30%	49,02%	1,85728

Nota: La tabla muestra el coeficiente de correlación de Pearson para la relación de temperatura y años de estudio

La Tabla 31 muestra los coeficientes de la recta de regresión. El coeficiente correspondiente a la constante es el origen de la recta de regresión, para año  $a = -284$ ; El coeficiente correspondiente a los años (pendiente de la recta de regresión) es  $b = 0,1567$ , valores que indican el cambio medio que corresponde a la variable independiente.

Tabla 31

*Coefficientes de la recta de regresión de TST*

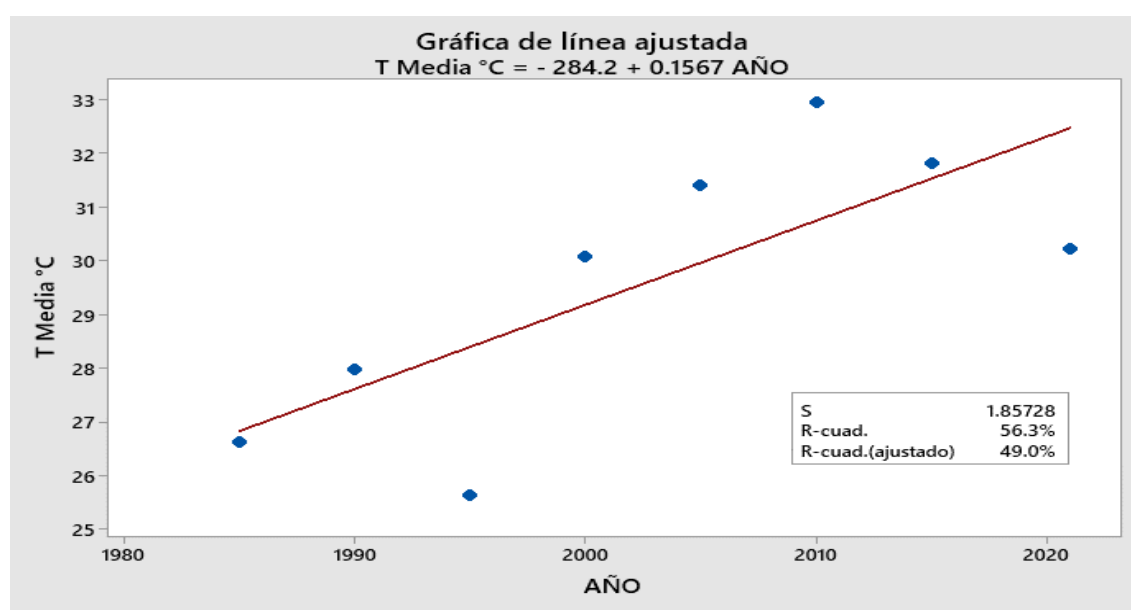
Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig. (p valor)
	B	Error tip.	Beta		
(Constante)	-284	113		-2,52	0,222
Año	0,1567	0,0564	0,750	2,78	0,032

Nota: Tabla resumen de relación de las variables temperatura media y años de estudio, periodo 1985-2021

Asimismo, se realizó la gráfica de la relación del comportamiento del a temperatura media en relación a los años de estudio (Figura 16), encontrándose que la relación entre el comportamiento del cambio de uso de suelo y la temperatura es 56,3 %.

Figura 16.

*Tendencia de la temperatura media periodo 1985-2021*



Nota: En el gráfico se observa la distribución de la relación de temperatura y años de estudio, y el comportamiento de la tendencia, periodo 1985-2021.

### 5.3 RELACION ENTRE CAMBIO DE USO DE SUELO Y VARIABILIDAD CLIMATICA

Para evaluar o determinar si existe alguna relación entre la variabilidad climática y el cambio de uso de suelo en la zona de estudio, se procedió a realizar un análisis estadístico, para tal efecto se procedió a analizar el cambio de uso de suelo (CUS) y la variabilidad climática (expresada por la variación de temperatura) en zona de estudio (Tabla 32); se procedió a realizar las pruebas de hipótesis para la zona de estudio, en primer lugar aplicando la prueba de correlación bivariada para determinar la existencia de correlación entre las variables utilizadas y la probabilidad de error en la hipótesis del investigador; seguidamente conociendo este dato se procedió a realizar el análisis de regresión lineal para determinar el porcentaje de relación entre el comportamiento de las variables.

Tabla 32

*Variación de cambio de uso de suelo y media de TST*

Periodo cambio	Variación CUS (ha)	Variación CUS (%)	T° LST Media (°C)
1985-1990	82,4	0,14	27,3
1990-1995	440,9	0,8	26,8
1995-2000	1655,6	2,9	27,9
2000-2005	2700,5	4,7	30,7
2005-2010	179,4	0,3	32,2
2010-2015	8374,9	14,6	32,4
2015-2021	9308	16,3	31,0

Nota: El cuadro se observa la relación de la serie de datos de las variables de estudio, periodo 1985-2021

#### Prueba de normalidad

En primer paso se realizó la prueba de normalidad, para validar si los datos presentan una distribución normal o no. (Tabla 33)

Tabla 33

*Prueba de normalidad*

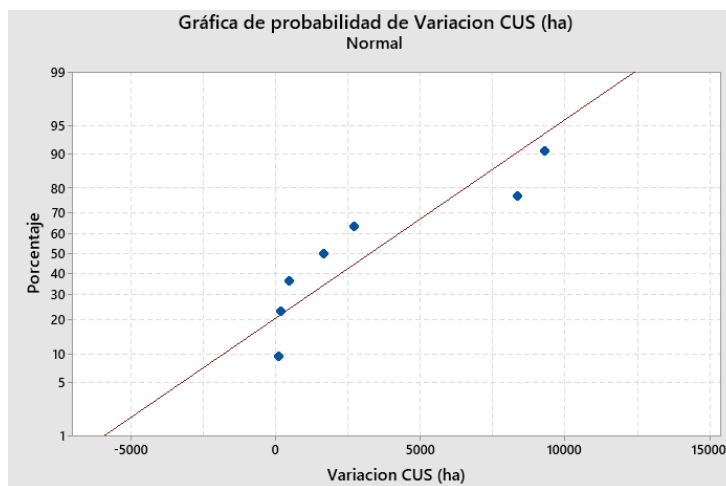
	Kolmogorov-Smirnov		Shapiro - Wilk	
	Estadístico	Sig.	Estadístico	Sig.
Cambio de uso de suelo	0,270	0,125	0,897	0,051
Temperatura	0,232	0,150	0,946	0,100

Nota: La tabla muestra el p valor de las pruebas estadísticas de normalidad para las variables temperatura y cambio de uso de suelo, periodo 1985-2021

Como el coeficiente de Shapiro-Wilk (Sig.) es mayor a 0,05, los datos siguen una distribución normal, comportamiento que se aprecia en las Figuras 17 y 18.

Figura 17.

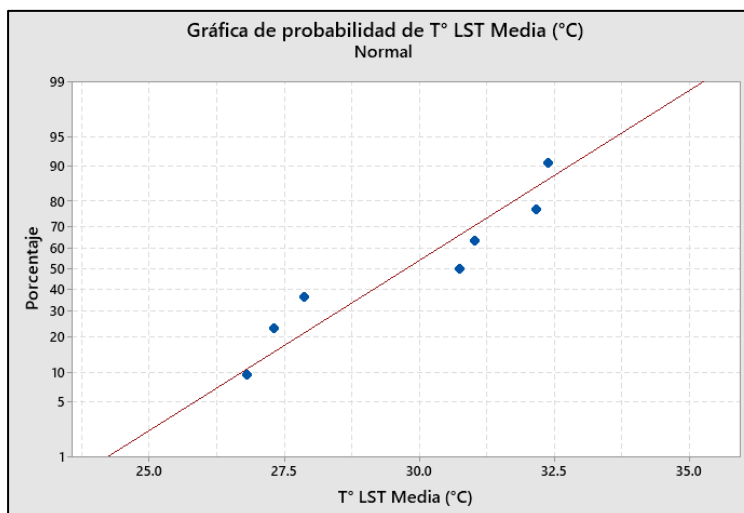
*Prueba de normalidad de cambio de uso de suelo*



Nota: Grafico que permite visualizar la prueba de normalidad de cambio de uso de suelo, periodo 1985-2021

Figura 18.

*Prueba de normalidad de temperatura media*



Nota: Grafico que permite visualizar la prueba de normalidad de temperatura de superficie terrestre, periodo 1985-2021

Conociendo la normalidad de los datos se procedió a realizar las pruebas de hipótesis para cada zona de la cuenca, en primer lugar, aplicando la prueba de correlación bivariada para determinar la existencia de correlación entre las variables utilizadas y la probabilidad de error en la hipótesis del investigador; seguidamente conociendo este dato se procedió a realizar el análisis de regresión lineal para determinar el porcentaje de relación entre el comportamiento de las variables.

### Prueba de hipótesis

Para la prueba de hipótesis, se realizó el planteamiento de la hipótesis nula (H0) y la hipótesis alterna (H1).

H0 = No existe correlación entre el Cambio de Uso de Suelo y la Variabilidad climática

H1 = Existe correlación entre el Cambio de Uso de Suelo y la Variabilidad climática

El análisis se realizó comparando las variables:

- Dependiente, Cambio de uso de suelo
- Independientes, Variabilidad climática (Temperatura)

Se realizó la prueba de correlación bivariada (Tabla 34) encontrándose: que, con una probabilidad de error de 17,6 % el cambio de uso de suelo está correlacionado con el cambio de la temperatura media.

Tabla 34

#### *Prueba de correlación bivariada*

		Cambio de uso de suelo	Temperatura media
Cambio de uso de suelo	Correlación de Pearson	1	0,576
	Sig (bilateral)		0,176
N		7	

Nota: La tabla muestra el p valor para la relación entre las variables cambio de uso de suelo y temperatura de superficie terrestre, periodo 1985-2021

Del análisis de regresión lineal (Tabla 35), la bondad de ajuste (R2) indica que la variación del cambio de uso de suelo esta explicada por la variación de temperatura en

33,2 %, y de acuerdo al coeficiente de correlación de Pearson entre dos variables (R): entre el cambio de uso de suelo y la temperatura ( $R = 0,576$ ) existe un moderado grado de correlación significativa.

Tabla 35

*Resumen del modelo*

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error tip. De la estimación
1	0,576	0,332	0,198	3 527,63

Nota: La tabla muestra el coeficiente de correlación de Pearson para la relación de temperatura y cambio de uso de suelo

La Tabla 36 muestra los coeficientes de la recta de regresión. El coeficiente correspondiente a la constante es el origen de la recta de regresión, para temperatura  $a = -25 243$ ; El coeficiente correspondiente a temperatura media (pendiente de la recta de regresión) es  $b = 957$ , valores que indican el cambio medio que corresponde a la variable independiente.

Tabla 36

*Coefficientes de la recta de regresión*

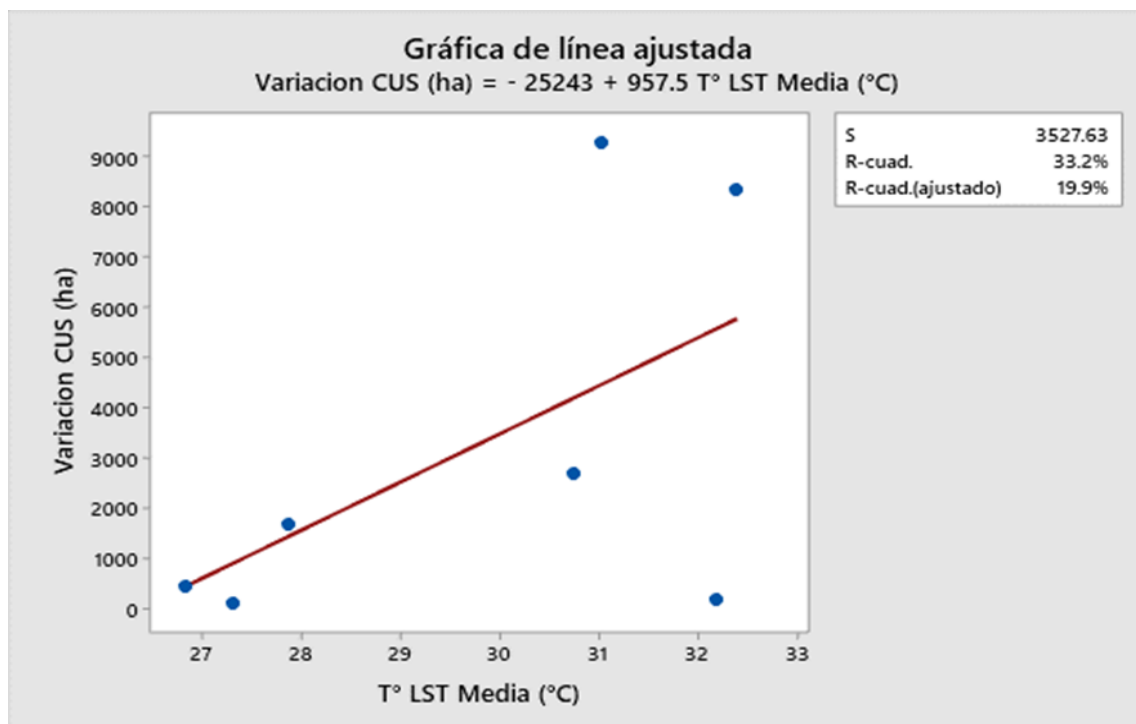
Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig. (p valor)
	B	Error tip.	Beta		
(Constante)	-25243	18119		-1,39	0,222
Temperatura media	957	607	0,576	1,58	0,176

Nota: Tabla que visualiza el p y coeficientes de la relación de las variables temperatura media y cambio de uso de suelo, periodo 1985-2021

Asimismo, se realizó la gráfica de la relación del comportamiento entre el uso de suelo y variabilidad climática expresada en temperatura (Figura 19), encontrándose que la relación entre el comportamiento del cambio de uso de suelo y la temperatura es 33,2 %.

Figura 19.

*Regresión lineal entre las variables cambio de uso de suelo y temperatura media TST*



Nota: En el gráfico se observa la distribución de la relación de temperatura y cambio de uso de suelo, periodo 1985-2021.

## 5.4 IMPACTO DE CAMBIOS DE USO DE SUELO Y TEMPERATURA SOBRE LA VEGETACION

### 5.4.1 INDICE DE VEGETACION DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI)

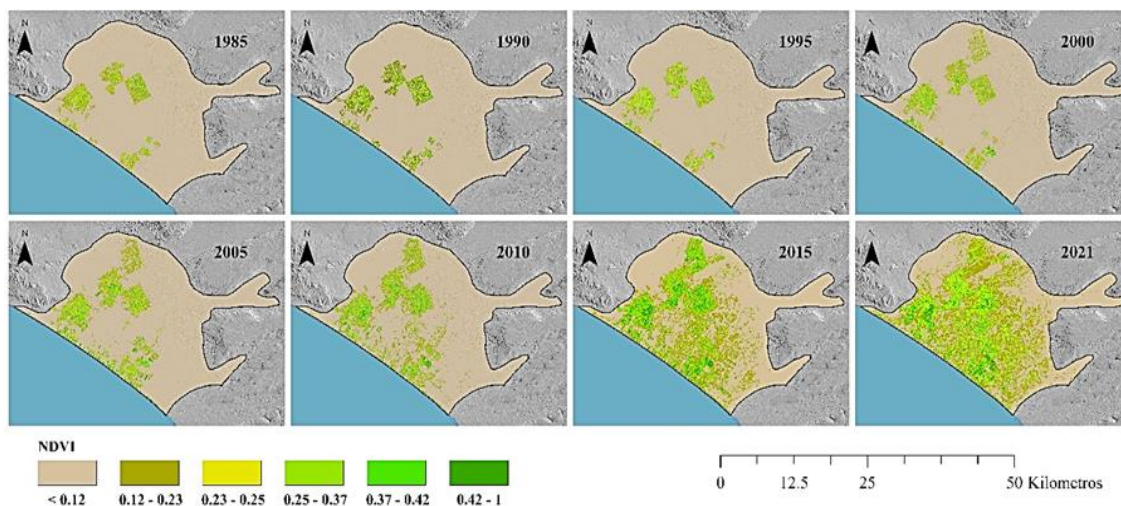
En pocas palabras, el índice de vegetación de diferencia normalizada es una medida del estado de salud de la planta basada en cómo ésta refleja la luz en determinadas frecuencias.

Según el NDVI (Figuras 20, 21), durante el período de análisis se observa una tendencia creciente en los estados fitosanitarios con algún grado de afectación en los cultivos de olivo. Esto se debe a la continua expansión de la frontera agrícola en la zona de estudio, así como a las condiciones de manejo y factores ambientales relacionados con la escasez de agua. En la Figura 21, se muestra que la superficie de plantas con un ataque de plagas muy fuerte y en un estado de marchitez permanente, con un NDVI de 0,12 a 0,21, ha

experimentado un incremento del 4,1 % al 23,9 %, estado de afectación con el mayor aumento en la zona de estudio. Las plantaciones con un ataque severo de plagas, presentan NDVI entre 0,21 y 0,37, y han experimentado un incremento del 10,9 %. La superficie de plantaciones con un ataque de plagas moderado, superan valores a 0,37, la cual han registrado un aumento en 3,3 %.

Figura 20

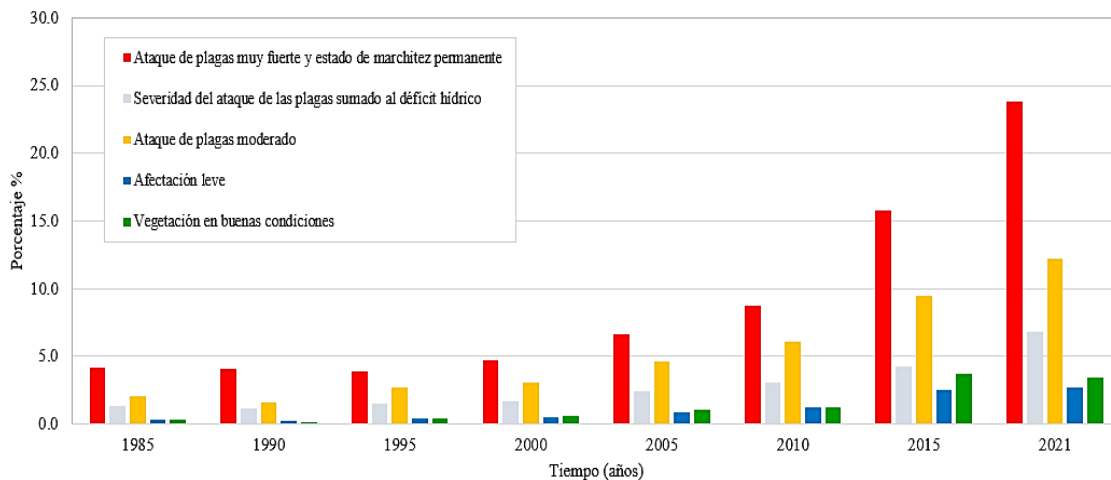
*Mapa cambio temporal del estado fitosanitario del área de cultivo, según índice NDVI en el periodo 1985 a 2021*



Nota: En el mapa se observa la distribución espacial fitosanitario del área de cultivo según NDVI durante el periodo 1985-2021

Figura 21

*Variación temporal del estado fitosanitario de cultivos, según NDVI*

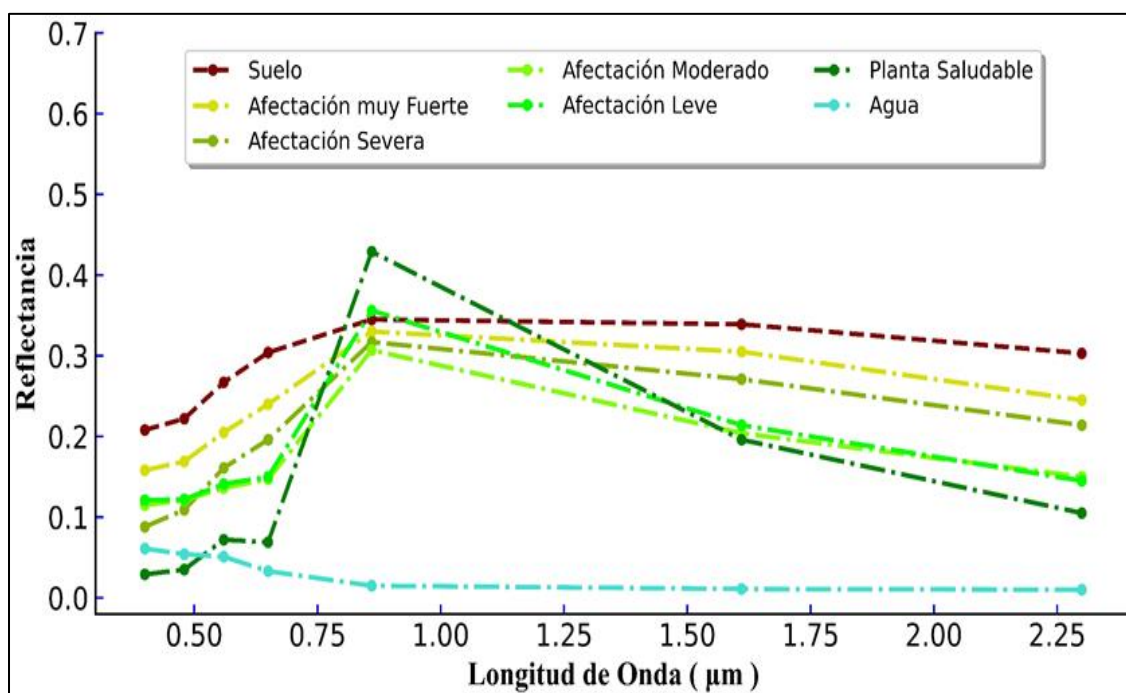


Nota: Se observa las categorías de estado fitosanitario del área de cultivo en función al NDVI, años 1985-2021

Las firmas espectrales ofrecen la posibilidad de detectar precozmente el estrés en grandes olivos, lo que ayudaría a los agricultores a tomar decisiones y optimizar la gestión, la salud y la productividad de los cultivos (Boshkovski et al., 2022); En la Figura 22 se presentan las firmas espectrales de diferentes estados de suelo, agua y salud fitosanitaria de los olivos. Cada estado muestra un comportamiento espectral distintivo, lo que facilita su identificación. Debido a la presencia de clorofila, las plantas sanas tienen una reflectancia baja en el espectro visible, una reflectancia menor en las bandas roja y azul, y una reflectancia mayor en la banda verde. En el infrarrojo cercano, la vegetación refleja fuertemente la luz con valores de reflectancia elevados (0,85  $\mu\text{m}$ ). En el caso de la cobertura vegetal con afectación severa, se observa un aumento en la reflectividad en la banda verde. Esto se debe a problemas en las hojas de la planta, como la reducción de la presencia de clorofila y la disminución en la absorción de la luz solar, lo que provoca cambios en el color de la planta y valores más bajos en el infrarrojo cercano.

Figura 22

*Curvas Reflectancia versus Longitud de onda para suelo desnudo, agua y estados fitosanitarios de olivo*



Nota: Se observa el comportamiento de la reflectancia de las longitudes de onda según estado fitosanitario del área de cultivo y asimismo suelo y agua

#### **5.4.2 EVALUACION DE INDICES DE SALUD DE LA VEGETACION**

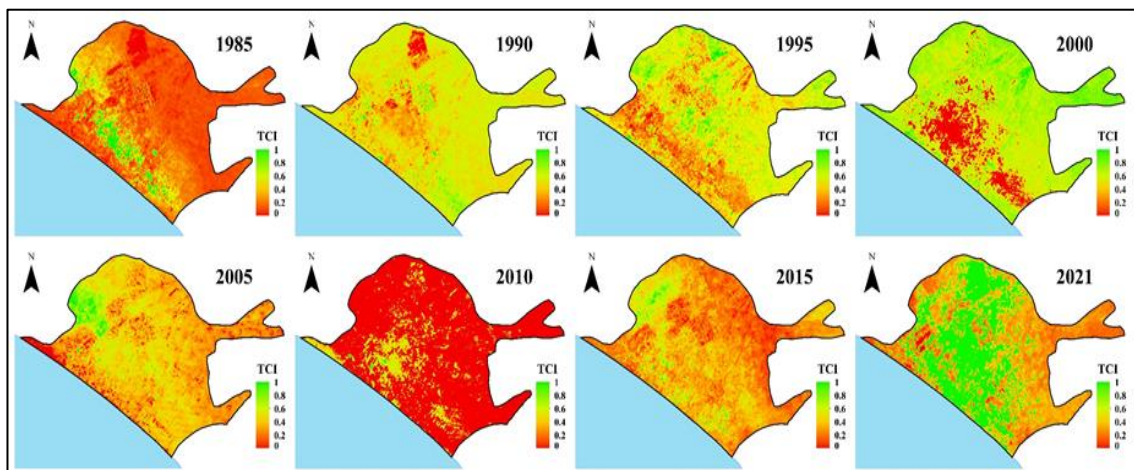
El cambio climático global continúa provocando sistemas atmosféricos y climáticos más extremos, como sequías, altas temperaturas las cuales generan impactos significativos en los campos de cultivos y la seguridad alimentaria. Mediante el uso de algoritmos de teledetección satelital, y las imágenes satelitales de resolución moderada (MODIS), producidos por los satélites Terra y Aqua de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), permiten realizar diferentes procesos SIG con la cual se obtiene los diferentes índices de evaluación de la situación de sequía o estrés de biomasa de la vegetación como: el índice de diferencia de vegetación normalizado (NDVI), índice de condición de la vegetación (VCI), índice de condición de temperatura (TCI) y índice de salud de la vegetación (VHI) de 1985 a 2021 se derivaron de las mediciones LANDSAT, las cuales permitieron evaluar la tendencia temporal de la salud de vegetación y los impactos de estrés por humedad y el estrés térmico permitiendo determinar la ocurrencia y la gravedad de la sequía.

##### **Índice de condición de Temperatura TCI**

El TCI se basa en el análisis del comportamiento de la temperatura de la superficie terrestre (LST) el cual permite monitorear el estrés del suelo de la cobertura de vegetación relacionado con el clima, o la situación de sequía meteorológica. (Kogan, 1997). En la Figura 23, se muestra la distribución espacial del índice de TCI para el periodo 1985-2021, donde se observa que durante los años 1985 y 2010 la mayor parte del área en estudio presentó situaciones de sequía meteorológica presentando índice de TCI  $< 0,4$ , mientras que los años 1995 y 2021 presentaron áreas con menor síntomas de sequía meteorológica presentando índices de TCI de hasta 1,0.

Figura 23

*Mapas TCI (Índice de condición de temperatura) de la irrigación La Yarada para los años 1985 al 2021*

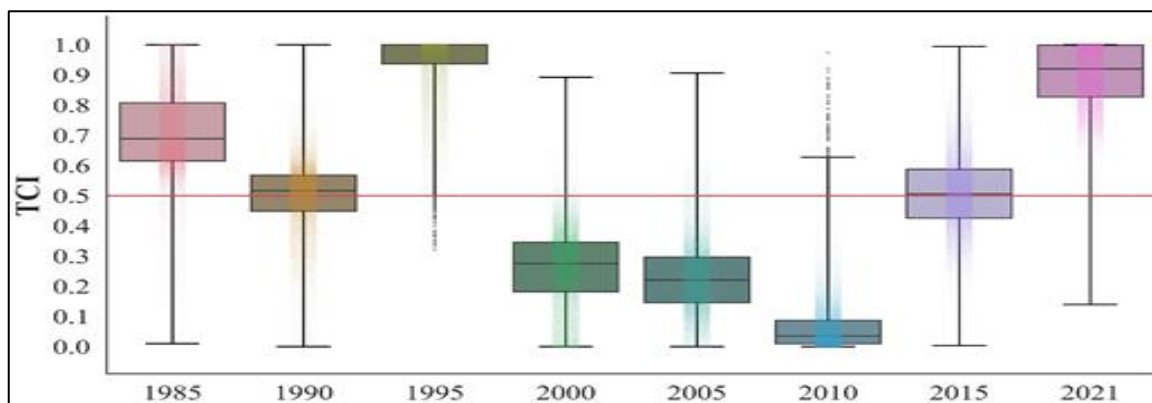


Nota: En el mapa se observa la distribución espacial del índice de condición de temperatura durante el periodo 1985-2021

El análisis de los datos cuantitativos de los píxeles en el área de estudio utilizando el índice de TCI, basado en datos de temperatura de brillo obtenidos de imágenes satelitales, se refleja en la Figura 24. En esta figura, se puede observar que, en los años 2000, 2005 y 2010, las áreas de cultivo experimentaron situaciones de estrés debido a la sequía meteorológica, ya que los índices de TCI fueron inferiores a 0,4. Por otro lado, en los años 1985, 1990, 1995, 2015 y 2021, no se observaron situaciones de estrés causadas por la sequía meteorológica, ya que los valores de TCI superaron el umbral de 0,4.

Figura 24.

*Diagrama de caja y bigotes de Índice de condición de temperatura*



Nota: En el gráfico se visualiza la distribución, tendencia central y cuartiles de índice de condición de temperatura (TCI) durante los años 1985-2021

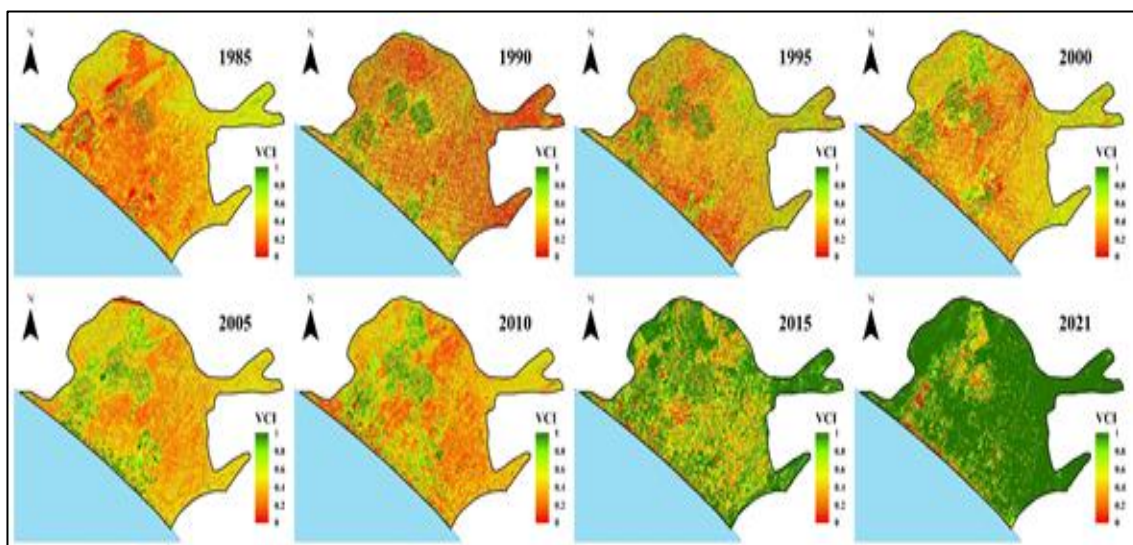
## Índice de Condición de vegetación VCI

El índice de condición de vegetación (VCI) se basa en el NDVI y puede monitorear de forma individual el impacto de la sequía en la salud de la vegetación. Sin embargo, el VCI es insuficiente por sí solo, ya que solo indica la condición de humedad de la vegetación (Jiao et al., 2016), Es comúnmente utilizado para identificar los efectos de la sequía hidrológica en la vegetación, independientemente de las variaciones climáticas (Shamsudeen et al., 2022).

La Figura 25, muestra la distribución espacial de VCI para el periodo 1985-2021, donde se observa que durante los años 1985 y 1990 la mayor parte del área en estudio presentó situaciones de sequía hidrológica presentando índice de VCI  $< 0.4$ , mientras que los años 2015 y 2021 presentaron áreas con menor síntomas de sequía hidrológica presentando índices de VCI  $> 0.6$ .

Figura 25

*Mapas VCI (Índice de condición de la temperatura) de la irrigación La Yarada para los años 1985 al 2021*



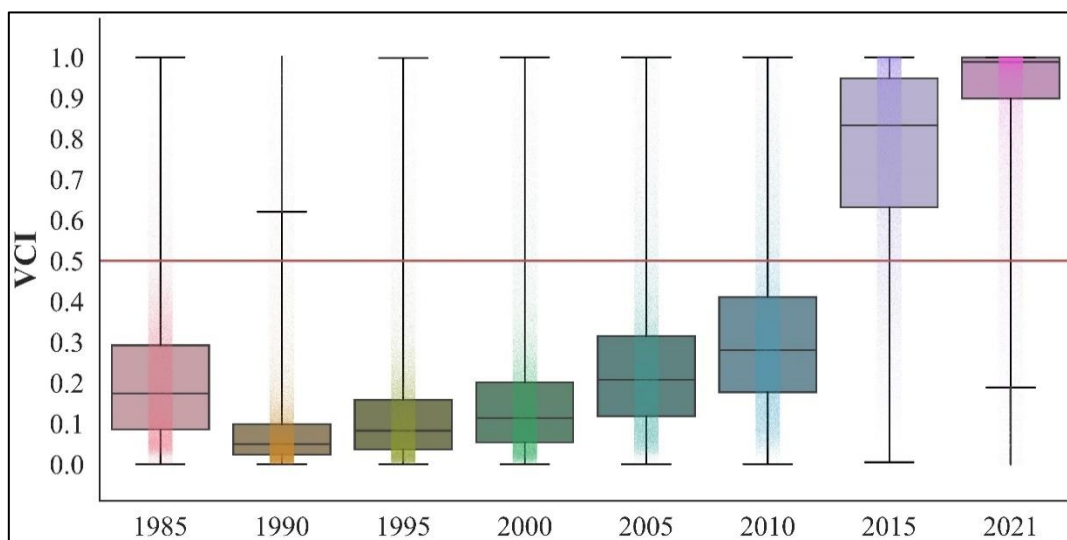
Nota: En el mapa se observa la distribución espacial del índice de condición de vegetación durante el periodo 1985-2021

El análisis de la Figura 26 muestra que durante el período de 1985 a 2010, más del 75 % de los valores de VCI se encuentran en el rango de 0,1 a 0,4, lo que indica sequía

moderada a grave. Esto se debe a la falta de humedad en esas áreas, especialmente en suelos desnudos. En contraste, las áreas cultivadas muestran valores más altos de VCI, generalmente entre 0,7 y 0,8, lo que indica condiciones favorables para la vegetación. A partir del año 2015, se observa un incremento significativo en la superficie cultivada con un valor promedio de VCI de 0,8, lo que señala condiciones libres de sequía. Sin embargo, algunas áreas aún muestran valores bajos de VCI, indicativos de sequía moderada a grave. En el año 2021, más del 75 % del área de estudio muestra valores altos de VCI ( $>0,8$ ), lo que indica la ausencia de sequías. No obstante, algunas áreas cercanas a la costa y en el interior al oeste y noroeste presentan valores bajos de VCI (entre 0,1 y 0,2), indicativos de sequía grave. Esto podría deberse al impacto negativo del fenómeno de intrusión marina en el agua de riego de los cultivos, lo que resulta en tierras abandonadas en esos años.

Figura 26

*Diagrama de caja y bigotes del Índice de condición de vegetación*



Nota: En el gráfico se visualiza la distribución, tendencia central y cuartiles de índice de condición de vegetación (VCI) durante los años 1985-2021

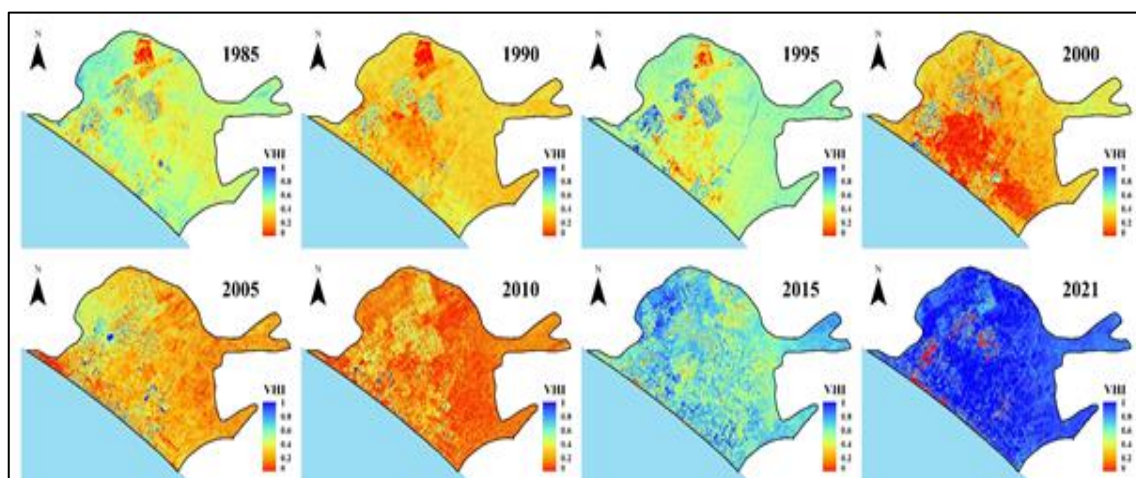
### Índice de Salud de vegetación VHI

El índice de salud de la vegetación (VHI) se determina a través de la relación del índice de condición de la vegetación (VCI) y el índice de condición de temperatura (TCI). La

razón detrás de utilizar el VHI para monitorear la sequía radica en que la evaluación de las condiciones de temperatura contribuye a identificar cambios sutiles en la salud de la vegetación. Esto se debe a que el impacto de la sequía es más pronunciado cuando la falta de humedad se combina con temperaturas elevadas. Por lo tanto, el VHI proporciona una perspectiva más completa de las condiciones de sequía al considerar tanto la humedad como la temperatura, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para evaluar el impacto de la sequía en la vegetación. (F. Kogan, 2002a). En la Figura 27, se observa la distribución espacial de índice de VHI correspondiente al periodo 1985-2021, donde se observa que, durante los años 2000, 2005 y 2010 la mayor parte del área en estudio presentó situaciones de sequía presentando índice de VHI  $< 0,4$ , mientras que los años 2015 y 2021 presentaron áreas con menor síntomas de sequía presentando índices de VHI  $> 0,6$ .

Figura 27

*Mapas VHI (Índice de salud de la vegetación) años 1985 al 2021*



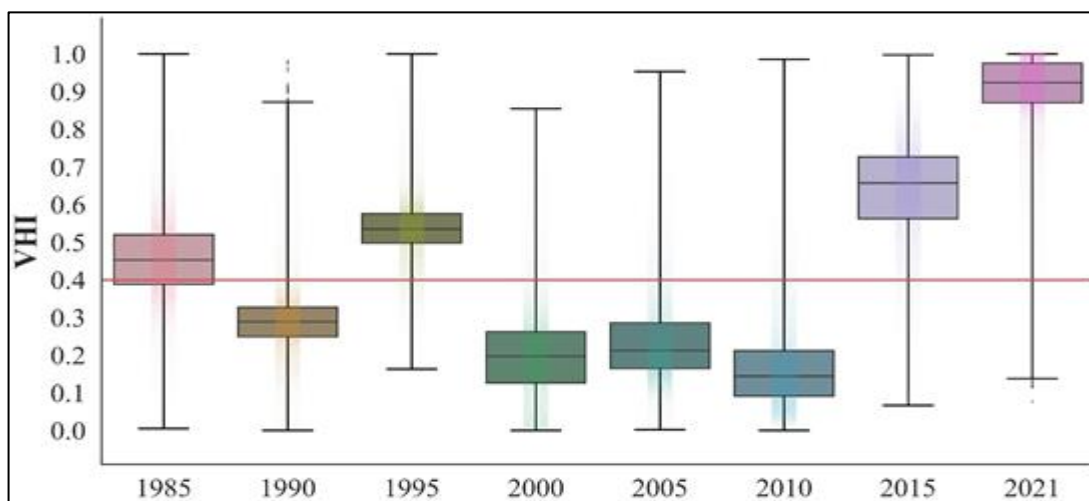
Nota: En el mapa se observa la distribución espacial del índice de salud de vegetación durante el periodo 1985-2021

La Figuras 28 muestran que, durante los años 1990, 2000, 2005 y 2010, se experimentaron condiciones de sequía, ya que los valores de VHI fueron inferiores a 0,4. En particular, el año 2010 mostró la sequía más intensa, con un índice VHI por debajo de 0,2, lo que se clasifica como una sequía severa. Esto se refleja claramente en el mapa de VHI de 2010. Por otro lado, en los años 1985, 1995, 2015 y 2021 no se registraron situaciones de sequía o estrés, ya que los índices de VHI superaron 0,4. En particular, el año 2021 exhibió un índice VHI mayor de 0,9 en la mayoría del área de cultivo, lo que se clasifica como un

año sin sequía. Estas áreas mostraron características de vegetación saludable debido a las condiciones de humedad adecuada.

Figura 28.

*Diagrama de caja y bigotes de Índice de salud de vegetación*



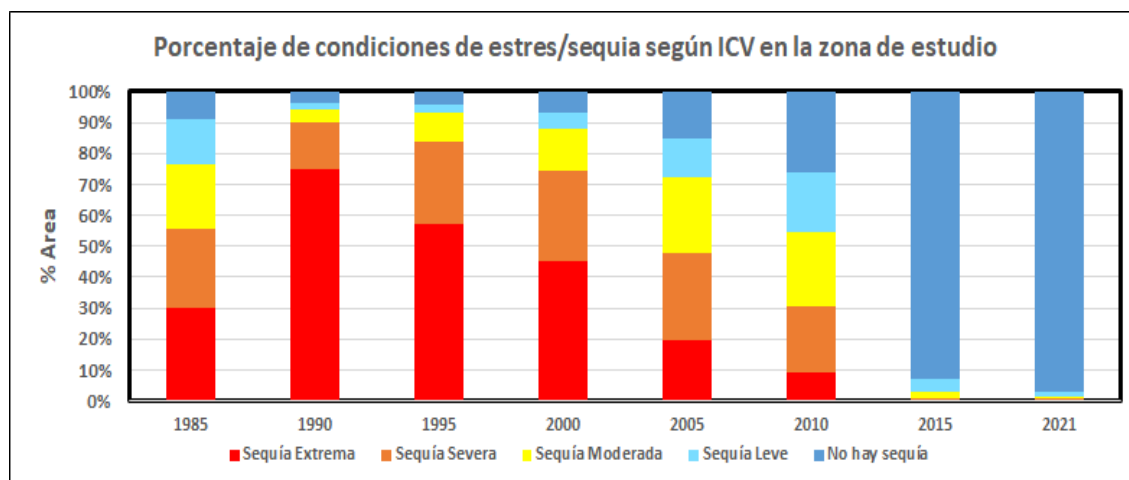
Nota: En el gráfico se visualiza la distribución, tendencia central y cuartiles de índice de salud de vegetación (VHI) durante los años 1985-2021

### 5.4.3 Patrones del ICV en la zona de estudio

En la presente investigación se muestra los patrones de estrés/sequía del ICV para los años 1985 al 2010 y 2015, 2021, en la zona de estudio periodo 1985 al 2021.

Figura 29

*Porcentaje de condiciones de estrés/sequía, periodo 1985-2021*



Nota: En el gráfico se visualiza el porcentaje del área cobertura que presenta diferentes situaciones de estrés, según índice de condición de vegetación (VCI) durante los años 1985-2021

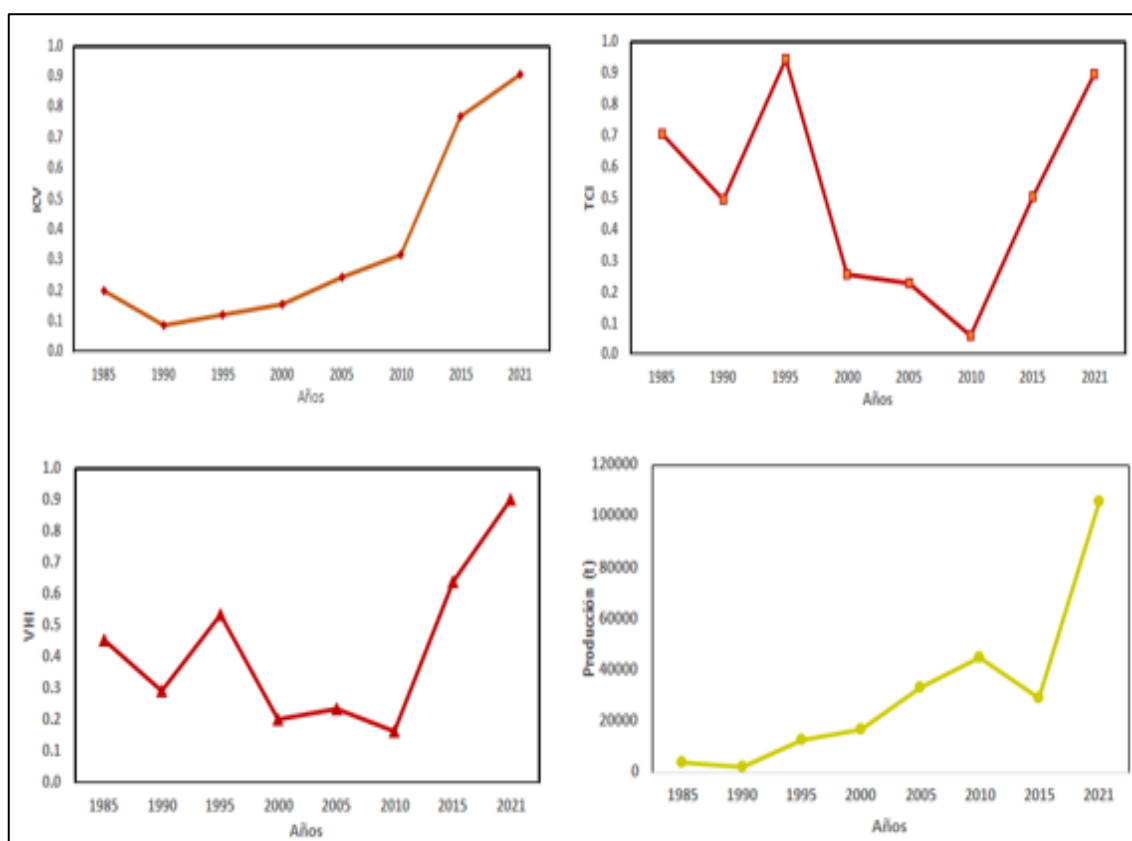
En la Figura 29, donde se muestra: El +30 % de áreas en condiciones de sequía extrema, +25 % de superficie en condiciones de sequía severa, +21 % de áreas en condiciones de sequía moderada, además +14 % de superficie en condiciones de sequía leve durante el 1985. El +75 % de áreas en condiciones de sequía extrema, +15 % de superficie en condiciones de sequía severa, +4 % de áreas en condiciones de sequía moderada, además +2 % de superficie en condiciones de sequía leve durante el 1990. El +57 % de áreas en condiciones de sequía extrema, +27 % de superficie en condiciones de sequía severa, +9 % de áreas en condiciones de sequía moderada, además +3 % de superficie en condiciones de sequía leve durante el 1955. El +45 % de áreas en condiciones de sequía extrema, +30 % de superficie en condiciones de sequía severa, +14 % de áreas en condiciones de sequía moderada, además +5 % de superficie en condiciones de sequía leve durante el 2000. El +20 % de áreas en condiciones de sequía extrema, +28 % de superficie en condiciones de sequía severa, +24 % de áreas en condiciones de sequía moderada, además +13 % de superficie en condiciones de sequía leve durante el 2005. El +9 % de áreas en condiciones de sequía extrema, +21 % de superficie en condiciones de sequía severa, +24 % de áreas en condiciones de sequía moderada, además +19 % de superficie en condiciones de sequía leve durante el 2010. Y por último el +2 % de áreas en condiciones de sequía moderada, y +4 % de superficie en condiciones de sequía leve durante el 2015.

#### **5.4.4 Serie de tiempo del promedio anual del VCI, TCI y VHI de la zona de estudio**

En la Figura 30 se muestra el promedio anual de la serie de tiempo del VCI, TCI y VHI, donde se observa que los valores de VCI reflejan condiciones de estrés/sequía durante desde 1985 a 2010, mientras que TCI presenta condiciones de alta variabilidad de estrés/sequía durante los años de estudio.

Figura 30

*Serie de tiempo del promedio anual del VCI, TCI, y VHI y rendimiento en la zona de estudio*



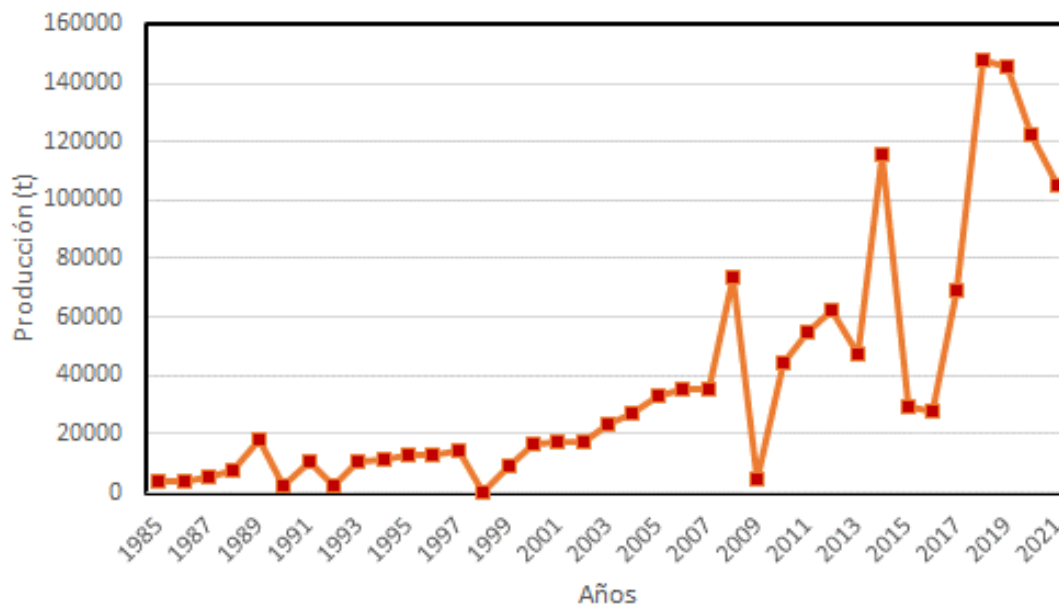
Nota: En los gráficos se visualiza la distribución anual de los índices de vegetación determinados en el área de estudio durante el periodo 1985-2021

#### 5.4.5 Serie y evaluación de los índices de estrés/sequía con la producción en la zona de estudio

Por su parte, los reportes del MINAGRI señalan una producción con baja variabilidad durante el periodo 1985 al 2005, mientras que durante el periodo 2006 al 2021 se observa un incremento de la producción (Figura 31), pero con una variabilidad significativa durante el periodo, situación posiblemente a causa de tipo ambiental y antrópico generando condiciones de estrés por altas temperaturas, déficit hídrico, y la situación económica.

Figura 31

*Serie de producción de olivo en la zona de estudio periodo 1985-2021*

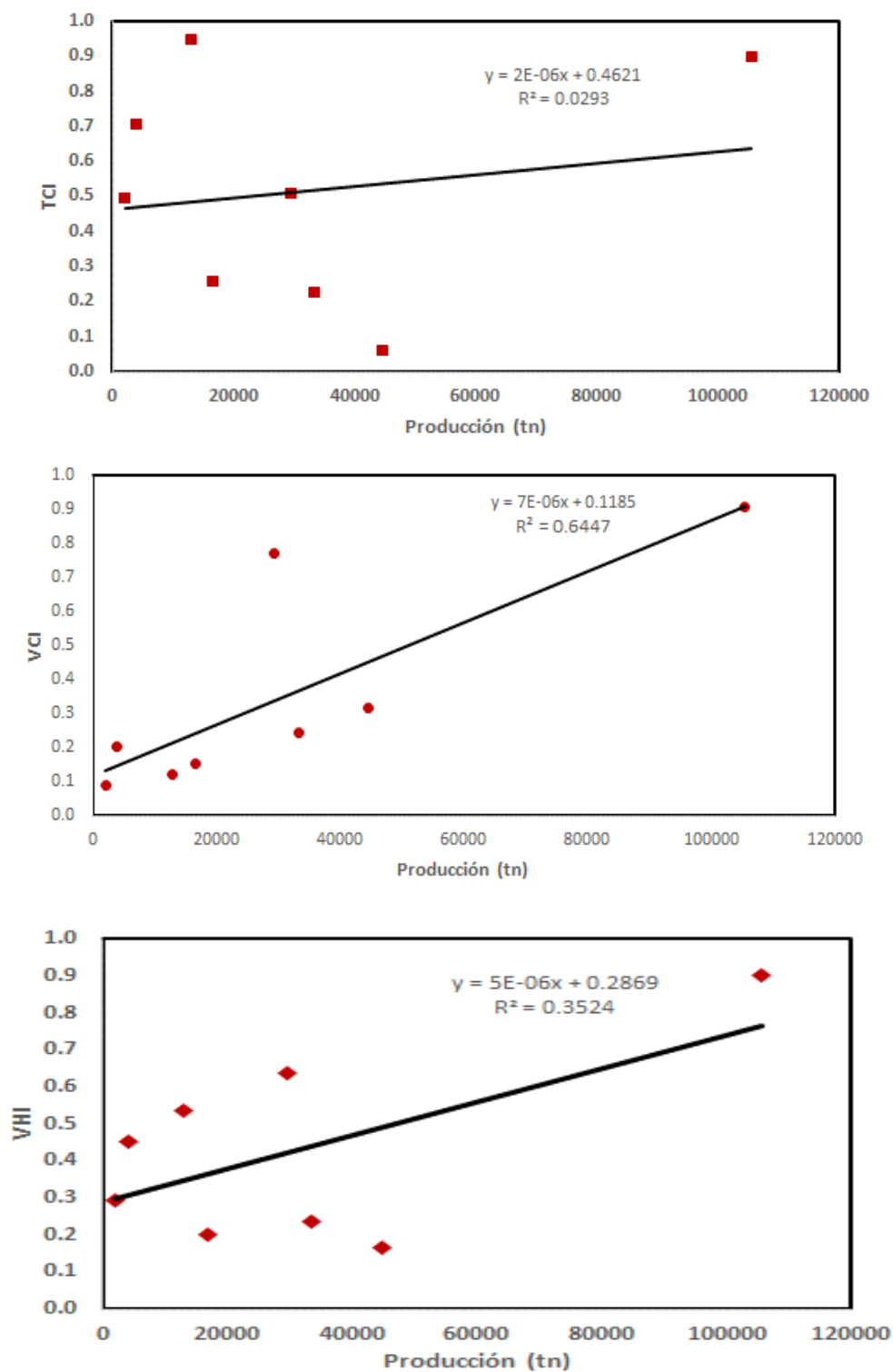


Nota: En el gráfico se observa la distribución a nivel anual de la producción de olivo en la zona de estudio, según MINAGRI Tacna

Evaluando la serie de tiempo del TCI con la producción, se muestra una correlación de 0,029. Para las series de tiempo del VCI con la producción, se muestra una correlación de 0,64 y la serie de tiempo del VHI con la producción, se obtiene una correlación de 0,35 (Figura 32).

Figura 32

*Análisis de correlación de Pearson de la serie de tiempo anual en la zona de índices de vegetación y producción de olivo*



Nota: En los gráficos se observa la distribución y la tendencia de la relación de las variables VTCI, VCI y VHI en función de rendimiento, en la cual se tiene que el VCI presenta un  $R^2=0.64$

## DISCUSIONES

El análisis de los cambios en la cobertura y uso de suelo estudiado durante los años 1985 a 2021, aplicando modelos de clasificación supervisada e imágenes satelitales, ha dado como resultado que el área ocupada por uso agrícola en la zona de estudio (La Yarada-Los Palos) durante el periodo de estudio 1985-2021 se extendió un total de 28 092.6 ha, lo que equivale a un crecimiento del 373,2 %, en relación a su área inicial, el cual es corroborado por el estudio de (Alvarado et al., 2020), donde determina que el área de cultivo se incrementó hasta 15 219,05 ha., durante el periodo 2000 -2020; asimismo, determina que el periodo donde hubo mayor incremento del área de cultivo fue el que transcurrió entre los años 2010 y 2015, el presente estudio determinó un incremento de 8 374,9 ha., mientras que el estudio de Alvarado et al., determino un incremento durante el mismo periodo de 8 570,79 ha. La expansión de las áreas de cultivo en la región podría estar relacionada con el crecimiento de la población y la dinámica socioeconómica del distrito. Se observa una correlación entre el aumento de la población y la expansión de las áreas de cultivo. Entre los años 2007 y 2017, la población del distrito se duplicó, y este período coincide con un aumento significativo en las áreas de cultivo. Según el censo, una parte importante de la población se dedica a actividades económicas relacionadas con la agricultura y la pesca en el distrito (INEI, 2017). Es importante destacar que la variación en la vegetación y el uso del suelo se ha identificado en diversos países como uno de los principales factores que contribuyen al deterioro del medio ambiente (Borrelli et al., 2017; Molla et al., 2022). El cambio de uso de la tierra, especialmente de áreas de cobertura natural a uso agrícola, y la intensificación de la gestión de suelos agrícolas están estrechamente relacionados con la erosión y el cambio climático (Vanwalleghem et al., 2017).

Uno de los factores que contribuyen al calentamiento global es los cambios de uso de suelo, dado que todo cambio de uso va a alterar o generar un impacto como es el incremento de la temperatura, como ser la deforestación, la ampliación de la frontera agrícola, la desertificación, etc; en el mapa de temperatura superficial terrestre se observa que durante los años 1985, 1990, 1995 y 2021 presenta valores bajos de temperatura cuyos rangos

varían de 20 °C a 40 °C, mientras que los años 2000, 2005, 2010 y 2015 presentan valores altos cuyos rangos varían de 24 °C a 50 °C; de igual forma se observa que en las áreas con cobertura vegetal presentan temperaturas bajas en relación a las áreas de sin cobertura o suelo desnudo donde se registran las temperaturas más altas. El año 2010 se observa que es al año con las temperaturas más altas con valores que fluctúan de 25 °C a 57 °C, mientras que el año 1985 presenta temperaturas más bajas cuyos valores fluctúan entre 20 °C a 45 °C; estas variaciones de la TST según estudios relacionan a la presencia de fenómenos naturales como ser fenómeno El Niño y La Niña las cuales son más frecuentes y de magnitud y duración variable, otro factor causante es debido al calentamiento global producto del efecto invernadero causado por diversas actividades antrópicas generadas en zonas donde se desarrolla actividades socio-económicas.

Para evaluar o determinar si existe alguna relación entre el cambio de uso de suelo y la variabilidad climática (TST) en la zona de estudio, se procedió a determinar las variaciones de cambio de uso y temperatura por periodos consecutivos, obteniéndose una serie de datos, al cual se procedió a realizar las pruebas de hipótesis para la zona de estudio, en primer lugar aplicando la prueba de correlación bivariada para determinar la existencia de correlación entre las variables utilizadas y la probabilidad de error en la hipótesis del investigador; seguidamente conociendo este dato se procedió a realizar el análisis de regresión lineal para determinar el porcentaje de relación entre el comportamiento de las variables, se determinó la existencia de una probabilidad de error de 17,6 % en la correlación de cambio de uso de suelo y temperatura media, de igual forma presenta un coeficiente de correlación de 0,576 lo cual indica un moderado grado de correlación significativa.

Los índices de vegetación (IV) constituyen los indicadores calculados a través de datos obtenidos de imágenes satelitales y firmas espectrales las cuales se utilizan para análisis de tipo cuantitativas y cualitativas en los cambio de biomasa de los cultivos (Jiménez-Jiménez et al., 2022; Moro et al., 2022). Mediante el cual no permite determinar los diferentes índices NDVI, DVI, GNDVI y EVI2 mediante la combinación de las bandas espectrales de reflectancia de la banda verde (GREEN); banda roja (RED) y del infrarrojo cercano (NIR); mediante las cuales podemos determinar o anticipar posibilidad de

detección temprana del estrés hídrico, estado fitosanitario, condición de biomasa en campos agrícolas, el cual permitirá a las autoridades, juntas de usuarios la activación de planes de contingencia en relación a la optimización al manejo de agua, control fitosanitario y la producción productividad de los cultivos (Boshkovski et al., 2022). El análisis de índice de vegetación NDVI ha permitido la evaluación de la salud de las plantas cultivadas en el área de estudio mediante categorías por de estado de fitosanidad, determinándose que la superficie de plantas enfermas por ataque de plagas, situación de estrés por factores abióticos y bióticos con NDVI de 0.12 a 0.37, varía entre 87,4 % a 95,2 % comprendiendo totales de áreas de 7 862,4 ha., a 24 549,5 ha., correspondiendo a los años 2005 y 2021. De igual forma, para el mismo período de análisis se determinó al grupo de plantas con valores de NDVI de 0,37 – 0,66 categorizadas como moderadamente sanas, representa entre 2,0 % a 10,4 % del área total de la superficie de cultivo, comprendiendo áreas de 116,2 ha., a 1 450,1 ha., correspondiendo a los años 1990 y 2015 con una diferencia significativa del periodo 2015 al 2021, observándose que durante el período más reciente una mejora continua en las labores culturales en el manejo de los cultivos; el estado de la cobertura vegetal de plantas categorizadas muy sanas con valores de NDVI mayor a 0,66, con tendencia a porcentajes más bajos durante el periodo de estudio representan entre 2,8 a 7,1 % de la superficie de área de cultivo, comprendiendo áreas de 81,2 ha., a 2 127,9 ha., correspondiendo a los años 1990 y 2015. Según (Latini et al., 2019), en Apulia (sur de Italia) comenzó el síndrome de caída rápida del olivo a partir del año 2015. Esta situación se encuentra preocupando a los productores de olivo y la región de Tacna no es ajena a dicho síndrome. Estos resultados son en relación al análisis de la fitosanidad de los cultivos mediante el NVDI son corroborados por le estudio realizado (Vargas & Huayna, 2022) donde se avaluó áreas de cultivo de olivo y mediante índices de vegetación determino rangos de índices que evaluaron la sanidad del cultivo, se determinó que la superficie ocupada por plantas enfermas, con valores de NDVI comprendidos entre 0,12 y 0,37, variaría entre el 42 y el 68 por ciento, y que durante el mismo periodo de análisis, se observaron plantas moderadamente sanas, con valores de NDVI que oscilaban entre 0,37 y 0,66, lo que corresponde a entre el 2 y el 18 por ciento de la zona de estudio. Se observó una diferencia significativa entre los años 2015 y 2020, situación comprensible a que durante los últimos años se viene promoviendo una mejora en las labores culturales, uso de semilla certificada, uso de riego tecnificado

en los campos de cultivo en esta zona de estudio. En relación a la cobertura vegetal que presenta características de muy sanas con  $NDVI > 0,66$ , se una tendencia a un 0 %.

Como uno de los objetivos del presente estudio es evaluar la variabilidad climática como indicador del cambio climático, para lo cual se determinó el TCI, el permite evaluar el comportamiento de la temperatura de la superficie terrestre (LST) y permite determinar la situación de estrés de la vegetación y su relación con el clima (Kogan, 1997). El TCI permite determinar el estrés por calor la cual es una función compleja de intensidad, duración y la tasa de aumento de la temperatura. Varios investigadores señalaron el impacto de las olas de calor y las altas temperaturas en el inicio de la sequía, la intensificación de la sequía, la salud de la vegetación (F. N. Kogan, 1995a). Sin embargo, en el proceso de análisis de sequía, generalmente se pasa por alto el impacto de las altas temperaturas o se subestima su papel e influencia en el desarrollo e intensificación de la sequía (Bandyopadhyay et al., 2016). Los resultados de TCI a nivel espacial se observan que los años 1985, 2005, 2010 y 2015 presentan índices de TCI inferiores caracterizando a esos años con alto nivel de estrés térmico y con indicios a la presencia de condiciones favorables de ocurrencia de una sequía meteorológica; asimismo, mediante el análisis estadístico de la muestra de los datos de los índices de TCI de los años de estudio se determinó que los años 1985, 1990, 1995, 2015 y 2021 no presentaron condiciones de estrés térmico dado que la mayor cantidad de valores de índices de TCI fueron mayor a 0,5; sin embargo los años 2000, 2005 y 2010 si presentaron condiciones de estrés térmico ya que la mayor cantidad de valores de índice de TCI fueron  $< 0,4$ , situación que conllevo a los agricultores a tomar medidas de prevención y adaptación ante la situación adversa a causa de las condiciones atmosféricas debido a las altas temperaturas que se vienen registrando a consecuencia del cambio climático. De igual forma se observa años con valores extremos de índice de TCI durante los años 1995 y 2010, situación que podemos relacionar a factores de cambio climático, fenómeno El Niño, que se presentaron durante los años 2009 y 2010 el cual es corroborado el estudio por (Pino-Vargas et al., 2022).

El índice de condición de vegetación VCI se basa en el NDVI, el mismo permite determinar la situación de sequía pero en forma individual, el cual es insuficiente porque indica sólo la condición de humedad vegetativa (Jiao et al., 2016), es constantemente

aplicado identificar los efectos del estrés por sequía sobre de la vegetación independientemente de las variaciones climáticas (Shamsudeen et al., 2022). En el área de estudio, durante el periodo 1985 – 2021 a nivel espacial se observa que durante los años 2015 y 2021 presentan mayor área con índices de VCI  $>0,5$  indicando la no presencia de sequía hidrológica o ausencia de estrés de los cultivos dado a que los cultivos presentaron condiciones favorables para su crecimiento y desarrollo; sin embargo, se observa que los años 1985, 1990, 1995, 2000, 2015 y 2010 se registraron mayor área en condiciones de sequía hidrológica ya que presentaron índices de VCI  $< 0,4$  esto debido a que dichas áreas presentaron deficiencias en la disponibilidad de recurso hídrico; El análisis de los datos del Índice de Condición de Vegetación (VCI) que has realizado proporciona información valiosa sobre las condiciones de sequía y la salud de la vegetación en la zona de estudio durante los diferentes años: durante los años 1985, 1990, 1995, 2000, 2005 y 2010, más del 75 % de la zona de estudio experimentó sequía moderada a grave, como se refleja en los bajos valores de VCI. Esto se debió a la falta de humedad en esas áreas, especialmente en suelos desnudos. Por otro lado, en las áreas de cultivo, los valores de VCI fueron más altos, indicando condiciones favorables de vegetación. Estas áreas tuvieron valores entre 0,7 y 0,8, lo que sugiere una salud vegetal adecuada. A partir de 2015, la superficie cultivada se incrementó significativamente, con un valor promedio de VCI de 0,8, lo que indica la ausencia de sequías en estas áreas; sin embargo, algunos sectores presentan valores bajos de VCI (entre 0,1 y 0,3). En 2021, la mayoría del área de estudio exhibió valores altos de VCI ( $>0,8$ ), lo que indica la ausencia de sequías. Sin embargo, hubo áreas cercanas a la franja litoral y en el interior al oeste y noroeste que presentaron valores bajos de VCI entre 0,1 y 0,2, lo que sugiere sequía grave. Esto podría estar relacionado con el fenómeno de intrusión marina, que afecta negativamente el suministro de agua de riego en los cultivos y ha llevado al abandono de tierras en esas áreas. Este análisis es esencial para comprender la variabilidad de las condiciones de sequía y la salud de la vegetación a lo largo de los años en la zona de estudio. Ayuda a identificar áreas vulnerables a la sequía y a tomar medidas para mitigar sus efectos en la agricultura y la gestión de recursos hídricos en la región.

El índice de salud de la vegetación (VHI), es una herramienta importante para evaluar la sequía y el estrés de la vegetación. El VHI se utiliza para identificar cambios en la salud

de la vegetación, y su utilidad radica en que la sequía es un fenómeno más grave cuando la escasez de humedad se combina con temperaturas elevadas. El VHI proporciona una evaluación integral de las condiciones de la vegetación, considerando tanto los factores climáticos como los hidrológicos. Esto permite detectar el estrés de la vegetación causado por una sequía prolongada, que es especialmente perjudicial cuando se combina con temperaturas altas (F. Kogan, 2002b). Los resultados muestran claramente que durante los años 1990, 2000, 2005 y 2010 han experimentado condiciones de sequía debido a que los valores de VHI son  $< 0.4$ ; asimismo, se observó que el año 2010 se presentó la sequía más intensa según el índice de VHI fue  $< 0.2$  categorizado como índice severo; En los años 1985, 1995, 2015 y 2021 no se registraron situaciones de sequía o estrés ya que los índices fueron  $> 0.4$ ; asimismo, se observa que el año 2021 los índices de VHI fueron  $> 0.9$  y según la clasificación considera un año sin sequía, reflejando que las áreas de cultivo presentan condiciones de vegetación saludable y alto contenido de humedad. En este sentido, las proyecciones del cambio climático global indican la existencia de efectos perjudiciales sobre los sistemas atmosféricos e hidrológicos, que provocarán notables variaciones de temperatura y precipitaciones en muchas partes del mundo (Gomez-Tunque et al., 2023; Pino-Vargas et al., 2022). De igual forma, las tendencias para el año 2050, la temperatura mínima y máxima se incrementaría a consecuencia del cambio climático (Pino-Vargas et al., 2022), situación que se refleja en los índices obtenidos, anomalías atribuibles al cambio climático.

Por otro lado, el efecto de la sobreexplotación o uso indiscriminado del agua subterránea (intrusión marina) ha motivado el abandono de las áreas de uso agrícola próximas a la línea de playa, de igual forma la salinidad del agua por intrusión marina y el costo de explotación del recurso hídrico reflejan los índices de VHI que caracterizan situaciones de sequía significativa en un mayor rango del periodo de estudio. El cambio de uso de suelo, así como la extensión de áreas con diferentes tipos de vegetación, influyen de manera significativa en los recursos de agua subterránea (Ismail et al., 2023).

## CONCLUSIONES

1. Se determinó que la expansión de la superficie agrícola ha aumentado considerablemente en un 373,22 % durante el período analizado, especialmente entre 2015 y 2021. Este aumento conlleva a una mayor explotación del recurso hídrico, ya que el principal recurso natural para el desarrollo de la actividad agrícola es el agua, por lo que se estaría generando un desequilibrio en el balance hídrico.
2. Del análisis de la variabilidad climática, se observa que la temperatura superficial terrestre mostró valores medios bajos en los primeros años (1985, 1990 y 1995), mientras que en los años posteriores (2000, 2005, 2010, 2015 y 2021) se registraron temperaturas medias más altas. Además, se detecta una tendencia de aumento de la temperatura media a razón de 0.15 °C por año, superando los valores reportados por el IPCC.
3. Se determinó una correlación significativa moderada (coeficiente de correlación de 0,576) entre el cambio de uso de suelo y la variabilidad climática, con una probabilidad de error del 17,6%. Esto sugiere que la variabilidad climática incide en las condiciones de cambio, pero no es la causa directa del cambio de uso de suelo.
4. En relación al impacto de los cambios de uso de suelo y variabilidad climática:  
El Índice de condición de temperatura (TCI) muestra una variabilidad irregular a lo largo de los años analizados. Se identificaron episodios de sequía en 2000, 2005 y 2010, con valores de TCI inferiores a 0.3, indicando condiciones críticas en áreas de cultivo. Por otro lado, en 1985, 1990, 1995, 2015 y 2021 no se observaron sequías, ya que los valores de TCI fueron superiores a 0.4. Por otro lado, el Índice de condición de vegetación (VCI) ha aumentado de manera constante desde 1985 hasta 2021, lo que sugiere una disminución de las sequías recientes. Sin embargo, los resultados del Índice de Humedad de Vegetación (VHI) muestran condiciones de sequía leves a moderadas en 1990, 2000, 2005 y 2010, mientras que, en 1985, 1995, 2015 y 2021 no

se observaron sequías, lo que indica condiciones de humedad adecuada para una vegetación saludable. Se determinó que el VCI es el índice que presenta una mayor correlación con la variable producción agrícola en la zona de estudio.

## **RECOMENDACIONES**

1. Continuar con la ejecución de investigaciones aplicando técnicas de teledetección empleando imágenes satelitales de mayor resolución y demás índices para una discriminación más precisa de las unidades de cobertura zonal.
2. Aplicar resultados de cambios en el uso del suelo para establecer planes de control sobre la sobreexplotación del recurso hídrico, para evitar conflictos futuros dada la expansión de la agricultura en la zona de estudio.
3. Elaborar documentos de gestión territorial para regular el uso y distribución del agua basados en los resultados de la investigación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado, A. I. A., Sotelo, P. C., Benites, C. C., Philipps, C. R., & Bejarano, G. V. (2020). Variación del área agrícola en el distrito La Yarada Los Palos, Tacna, Perú. *Espacio y Desarrollo*, 35, 99-120.  
<https://doi.org/10.18800/espacioydesarrollo.202001.004>
- Andalón, M. B., & Rodríguez, G. A. (2005). Cambio de Uso del Suelo y Deforestación en el Estado de Jalisco. *SEMARNAT*, 13.
- Ashley M. Abrook, Alice M. Milner, & Ian Candy. (s. f.). *Environmental variability in response to abrupt climatic change during the Last Glacial–Interglacial Transition (16–8 cal ka BP): Evidence from Mainland, Orkney*. Recuperado 19 de septiembre de 2023, de <https://chooser.crossref.org/>
- Avdan, U., & Jovanovska, G. (2016). Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data. *Journal of Sensors*, 2016, e1480307. <https://doi.org/10.1155/2016/1480307>
- Bandyopadhyay, N., Bhuiyan, C., & Saha, A. K. (2016). Heat waves, temperature extremes and their impacts on monsoon rainfall and meteorological drought in Gujarat, India. *Natural Hazards*, 82(1), 367-388.  
<https://doi.org/10.1007/s11069-016-2205-4>
- Bartz, M., Walk, J., Binnie, S. A., Brill, D., Stauch, G., Lehmkuhl, F., Hoffmeister, D., & Brückner, H. (2020). Late Pleistocene alluvial fan evolution along the coastal Atacama Desert (N Chile). *Global and Planetary Change*, 190, 103091.  
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103091>
- Baude, M., Meyer, B. C., & Schindewolf, M. (2019). Land use change in an agricultural landscape causing degradation of soil based ecosystem services. *Science of The Total Environment*, 659, 1526-1536.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.455>
- Benedikt Ritter, Volker Wennrich, Dominik Brill, Georgina King, Sascha Schneiderwind, Karin Niemann, Emma Fernández-Galego, Julia Diederich, & Martin Melles & Tibor J. Dunai. (2019). “*Climatic fluctuations in the hyperarid*

core of the Atacama Desert during the past 215 ka” | *Scientific Reports*.

<https://www.nature.com/articles/s41598-019-41743-8>

- Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schütt, B., Ferro, V., Bagarello, V., Oost, K. Van, Montanarella, L., & Panagos, P. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 8(1), 2013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Boshkovski, B., Doupis, G., Zapolska, A., Kalaitzidis, C., & Koubouris, G. (2022). Hyperspectral Imagery Detects Water Deficit and Salinity Effects on Photosynthesis and Antioxidant Enzyme Activity of Three Greek Olive Varieties. *Sustainability*, 14(3), 1432. <https://doi.org/10.3390/su14031432>
- Boshkovski, B., Doupis, G., Zapolska, A., Kalaitzidis, C., & Koubouris, G. (2022, junio 25). *Hyperspectral Imagery Detects Water Deficit and Salinity Effects on Photosynthesis and Antioxidant Enzyme Activity of Three Greek Olive Varieties*. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/3/1432>
- Cambio y variabilidad climatica\_Gerardo Damonte.pdf*. (s. f.). Recuperado 11 de agosto de 2022, de [http://www.grade.org.pe/forge/descargas/Cambio%20y%20variabilidad%20climatica\\_Gerardo%20Damonte.pdf](http://www.grade.org.pe/forge/descargas/Cambio%20y%20variabilidad%20climatica_Gerardo%20Damonte.pdf)
- El Bilali, A., Abdeslam, T., Ayoub, N., Lamane, H., Ezzaouini, M. A., & Elbeltagi, A. (2023). An interpretable machine learning approach based on DNN, SVR, Extra Tree, and XGBoost models for predicting daily pan evaporation. *Journal of Environmental Management*, 327, 116890. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116890>
- Espinosa Zúñiga, J. J. (2020). Aplicación de algoritmos Random Forest y XGBoost en una base de solicitudes de tarjetas de crédito. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 21(3), 1-16. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2020.21.3.022>
- Espinoza-Molina, J., Acosta-Caipa, K., Chambe-Vega, E., Huayna, G., Pino-Vargas, E., & Abad, J. (2022). Spatiotemporal Analysis of Urban Heat Islands in Relation to Urban Development, in the Vicinity of the Atacama Desert. *Climate*, 10(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/cli10060087>

- García Hernández, Misael;, Pérez Magaña, Andrés, Gutiérrez Villalpando, Verónica, & Carlos Alberto Zúniga-González. (2020). Cambio de uso de suelo y variabilidad climática en chiautzingo, puebla, méxico. *Rev. iberoam. bioecon. cambio clim.*, 6(11), 1295-1315. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v6i11.9421>
- Gomez-Tunque, K. R., Ingol-Blanco, E., Mejia-Marcacuzco, A., Chávarri-Velarde, E., & Pino-Vargas, E. (2023). *Deep Neural Networks for ENSO Prediction in the Niño 3.4 and Niño 1+2 Regions*. 307-316. <https://doi.org/10.1061/9780784484852.030>
- Han, Y., Li, Z., Huang, C., Zhou, Y., Zong, S., Hao, T., Niu, H., & Yao, H. (2020). Monitoring Droughts in the Greater Changbai Mountains Using Multiple Remote Sensing-Based Drought Indices. *Remote Sensing*, 12(3), 530. <https://doi.org/10.3390/rs12030530>
- Hunt, E. R., Hively, W. D., Fujikawa, S., Linden, D., Daughtry, C. S., & McCarty, G. (2010). Acquisition of NIR-Green-Blue Digital Photographs from Unmanned Aircraft for Crop Monitoring. *Remote Sensing*, 2(1), 290-305. <https://doi.org/10.3390/rs2010290>
- IPCC. (2000). *Land Use, Land-Use Change and Forestry*. [https://archive.ipcc.ch/ipccreports/sres/land\\_use/index.php?idp=0](https://archive.ipcc.ch/ipccreports/sres/land_use/index.php?idp=0)
- Ismail, S., Ahmed, M. F., & Bakar, M. Z. A. (2023). Assessing the impact of urbanization on groundwater quality of lahore region, Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(35), 83929-83949. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28400-4>
- Jiang, Z., Huete, A., Didan, K., & Miura, T. (2008). Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*, 112(10), 3833-3845. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.006>
- Jiao, W., Zhang, L., Chang, Q., Fu, D., Cen, Y., & Tong, Q. (2016, marzo 10). *Evaluating an Enhanced Vegetation Condition Index (VCI) Based on VIUPD for Drought Monitoring in the Continental United States*. <https://www.mdpi.com/2072-4292/8/3/224>
- Jiménez-Jiménez, S. I., Marcial-Pablo, M. de J., Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Inzunza-Ibarra, M. A., & Sánchez-Cohen, I. (2022). VICAL: Global Calculator to Estimate Vegetation Indices for Agricultural Areas with Landsat

- and Sentinel-2 Data. *Agronomy*, 12(7), 1518.  
<https://doi.org/10.3390/agronomy12071518>
- Jordan, C. F. (1969). Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. *Ecology*, 50(4), 663-666. <https://doi.org/10.2307/1936256>
- Kogan, F. (2002a). World droughts in the new millennium from AVHRR-based vegetation health indices. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 83(48), 557. <https://doi.org/10.1029/2002EO000382>
- Kogan, F. (2002b, noviembre 26). *World droughts in the new millennium from AVHRR-based vegetation health indices*.  
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2002EO000382>
- Kogan, F. N. (1995a). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 15(11), 91-100.  
[https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00079-T](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-T)
- Kogan, F. N. (1995b). Droughts of the Late 1980s in the United States as Derived from NOAA Polar-Orbiting Satellite Data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76(5), 655-668. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1995\)076<0655:DOTLIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1995)076<0655:DOTLIT>2.0.CO;2)
- Kogan, F. N. (1997). Global Drought Watch from Space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(4), 621-636. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2)
- Latini, A., Foxi, C., Borfecchia, F., Lentini, A., De Cecco, L., Iantosca, D., Serafini, M., Laneri, U., Citterio, M., Campiotti, A., Benelli, G., & Mariani, S. (2019). Tacking the vector of *Xylella fastidiosa*: Geo-statistical analysis of long-term field observations on host plants influencing the distribution of *Phylloxera spumarius* nymphs. *Environmental Science and Pollution Research* 2019 26:7, 26(7), 6503-6516. <https://doi.org/10.1007/S11356-018-3870-5>
- Mendoza, M., Granados, E., & Pérez-Salicrup, D. (2015). *Evaluación espacial y multitemporal de los cambios de cobertura y uso del terreno en la cuenca del lago de Cuitzeo: Implicaciones para la sucesión forestal y el mantemiento de la diversidad vegetal*.

- Molla, E., Getnet, K., & Mekonnen, M. (2022). Land use change and its effect on selected soil properties in the northwest highlands of Ethiopia. *Heliyon*, 8(8), e10157. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10157>
- Moro, L. D., Maculan, L. S., Pivoto, D., Cardoso, G. T., Pinto, D., Adelodun, B., Bodah, B. W., Santosh, M., Bortoluzzi, M. G., Branco, E., & Neckel, A. (2022). Geospatial Analysis with Landsat Series and Sentinel-3B OLCI Satellites to Assess Changes in Land Use and Water Quality over Time in Brazil. *Sustainability*, 14(15), 9733. <https://doi.org/10.3390/su14159733>
- Moro, L. D., Maculan, L. stolfo, Pivoto, D., Cardoso, T., & Pinto, D. (2022, agosto). *Geospatial Analysis with Landsat Series and Sentinel-3B OLCI Satellites to Assess Changes in Land Use and Water Quality over Time in Brazil*. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/15/9733>
- Munir, S., Seminar, K. B., Sudradjat, Sukoco, H., & Buono, A. (2023). The Use of Random Forest Regression for Estimating Leaf Nitrogen Content of Oil Palm Based on Sentinel 1-A Imagery. *Information*, 14(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/info14010010>
- Narvaez-Montoya, C., Torres-Martínez, J. A., Pino-Vargas, E., Cabrera-Olivera, F., Loge, F. J., & Mahlknecht, J. (2022). Predicting adverse scenarios for a transboundary coastal aquifer system in the Atacama Desert (Peru/Chile). *Science of The Total Environment*, 806, 150386. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150386>
- Ochoa, W., Rivera, P., Salguero, M., & Gonzales, B. (2016). USO DE LA TIERRA Y VARIABILIDAD CLIMATICA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO PANAJACHEL, SOLOLÁ, GUATEMALA. *UNICA - XII Conferencia Científica Internacional*, 14.
- Pabón, J. D., Rodríguez, N., Bernal, N. R., Castiblanco, M. A., & Sánchez, Y. V. (2013). MODELAMIENTO DEL EFECTO DEL CAMBIO EN EL USO DEL SUELO EN EL CLIMA LOCAL-REGIONAL SOBRE LOS ANDES COLOMBIANOS. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 37(144), 379-391.
- Pérez, J. I. J. (2021). *Estudio de los procesos de cambio de uso del suelo en México. 1a Edición*, 156.

- Pino V., E. (2019). The La Yarada coastal aquifer, after 100 years of exploitation as a sustenance for agriculture in arid zones: A historical review. *Idesia (Arica)*, 37(3), 39-45. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292019000300039>
- Pino V., E., Ramos F., L., Mejía M., J., Chávarri V., E., Ascencios T., D., Pino V., E., Ramos F., L., Mejía M., J., Chávarri V., E., & Ascencios T., D. (2020). Medidas de mitigación para el acuífero costero La Yarada, un sistema sobreexplotado en zonas áridas. *Idesia (Arica)*, 38(3), 21-31. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292020000300021>
- Pino V. Edwin, & Ascencios T., D. (2022, noviembre 15). *Sostenibilidad del cultivo de olivo bajo un enfoque climatológico en una región árida, cabecera del desierto de Atacama | Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. <https://revistacta.agrosavia.co/index.php/revista/article/view/2652>
- Pino-Vargas, E., Ascencios-Templo, D., Pino-Vargas, E., & Ascencios-Templo, D. (2021). THE IMPLEMENTATION THE CLOSURE AS A TOOL TO CONTROL THE DEGRADATION OF THE COASTAL AQUIFER LA YARADA, TACNA, PERU. *Diálogo andino*, 66, 489-496. <https://doi.org/10.4067/S0719-26812021000300489>
- Pino-Vargas, E., Pino-Vargas, E., Chávarri-Velarde, E., & Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Peru. (2022). Evidencias de cambio climático en la región hiperárida de la costa sur de Perú, cabecera del desierto de Atacama. *Tecnología y ciencias del agua*, 13(1), 333-376. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2022-01-08>
- Qiao Yifan, Guang Zheng, Zihan Du, Xiao Ma, & Jiarui Li. (2023, febrero 27). *Tree-Species Classification and Individual-Tree-Biomass Model Construction Based on Hyperspectral and LiDAR Data*. <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/5/1341>
- Qingchen, C., Changyi, L., & Jiashuang, Y. (2014). The Evolvement of Impact and Adaptation on Climate Change and Their Implications on Climate Policies. *Advances in Climate Change Research*, 10(3), 167. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1719.2014.03.002>
- Rojas, A. E., & Ibarra, J. (s. f.). La degradación del suelo y sus efectos sobre la población. *POBLACIÓN Y DESARROLLO*, 6.

- Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *In Proceedings of the Third ERTS Symposium; NASA: Washington, DC, USA, 1*, 309-317.
- Salvador, D. G. C., Ernesto Núñez Flores, Roberto Ramírez García, Julio César Romero. (2017). *Alterar el suelo contribuye al cambio climático*. Ciencia UNAM. <https://ciencia.unam.mx/leer/633/alterar-el-suelo-contribuye-al-cambio-climatico>
- Samaniego Rojas, N. S. (2013). *Análisis de vulnerabilidad en zonas potenciales de recarga hídrica por efectos de cambios de uso de suelo y por variabilidad climática en la microcuenca del Río Purires, Costa Rica*. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/329>
- Samuel Chucuya, Alissa Vera, Edwin Pino-Vargas, & André Steenken. (s. f.). *Hydrogeochemical Characterization and Identification of Factors Influencing Groundwater Quality in Coastal Aquifers, Case: La Yarada, Tacna, Peru*. Recuperado 19 de septiembre de 2023, de <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/5/2815>
- Shamsudeen, M., Padmanaban, R., & Cabral, P. (2022). *Análisis espacio-temporal del impacto de los cambios en el paisaje sobre la vegetación y la temperatura de la superficie terrestre en Tamil Nadu*. 25.
- Singh, R. K., Kumar, M., Kumar, P., & Singh, S. (2022, marzo 4). *Artificial Machine Learning–Based Classification of Land Cover and Crop Types Using Sentinel-2A Imagery—Sustainable Agriculture Systems and Technologies—Wiley Online Library*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119808565.ch16>
- Stein, B. A., Staudt, A., Cross, M. S., Dubois, N. S., Enquist, C., Griffis, R., Hansen, L. J., Hellmann, J. J., Lawler, J. J., Nelson, E. J., & Pairis, A. (2013). Preparing for and managing change: Climate adaptation for biodiversity and ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(9), 502-510. <https://doi.org/10.1890/120277>
- Torres Castillo, N. E., Melchor-Martínez, E. M., Ochoa Sierra, J. S., Ramirez-Mendoza, R. A., Parra-Saldívar, R., & Iqbal, H. M. N. (2020). Impact of climate change and early development of coffee rust – An overview of control strategies to

- preserve organic cultivars in Mexico. *Science of The Total Environment*, 738, 140225. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140225>
- Ttito Jordan, B. J. (2020). “Cambio de uso de suelo y variabilidad climática en la cuenca media del Vilcanota (Valle Sagrado de los Incas), período 1975—2015”. *Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa*.  
<http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3262890>
- Vanwalleghem, T., Gómez, J. A., Infante Amate, J., González de Molina, M., Vanderlinden, K., Guzmán, G., Laguna, A., & Giráldez, J. V. (2017). Impact of historical land use and soil management change on soil erosion and agricultural sustainability during the Anthropocene. *Anthropocene*, 17, 13-29.  
<https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.01.002>
- Vargas, E. M. P., & Huayna, G. (2022). Evolución espacial y temporal de cultivo del olivo por efecto del ataque de plagas, utilizando sensoramiento remoto y procesamiento de imágenes satelitales. *Scientia Agropecuaria*, 13(2), Article 2.  
<https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.013>
- Vergni, Lorenzo & Francesca Todisco. (2023, mayo 22). *A Random Forest Machine Learning Approach for the Identification and Quantification of Erosive Events*.  
<https://www.mdpi.com/2073-4441/15/12/2225>
- WGI\_AR5\_glossary\_ES.pdf. (s. f.). Recuperado 16 de agosto de 2022, de  
[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI\\_AR5\\_glossary\\_ES.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI_AR5_glossary_ES.pdf)
- Yepes Piquera. (2008). *Acuífero – El blog de Víctor Yepes*.  
<https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/acuifero/>
- Zhang, L., Jiao, W., Zhang, H., Huang, C., & Tong, Q. (2017). Studying drought phenomena in the Continental United States in 2011 and 2012 using various drought indices. *Remote Sensing of Environment*, 190, 96-106.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.010>
- Zhao, L., Lee, S., & Jeong, S.-P. (2021). Decision Tree Application to Classification Problems with Boosting Algorithm. *Electronics*, 10(16), Article 16.  
<https://doi.org/10.3390/electronics10161903>

## **ANEXO**

Link de la información estimada en trabajo de información

[https://docs.google.com/spreadsheets/d/1WdnZvR88benAFxPj4eptdgzg4\\_zZaVx/edit?usp=drive\\_link&oid=105714277868764757390&rtpof=true&sd=true](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1WdnZvR88benAFxPj4eptdgzg4_zZaVx/edit?usp=drive_link&oid=105714277868764757390&rtpof=true&sd=true)