



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Escuela de Pregrado
Carrera de Geografía

EVOLUCION DEL ESTADO DE LOS CULTIVOS EN EL VALLE DEL LIMARÍ,
REGION DE COQUIMBO, CHILE.

Memoria para optar al título de Geógrafa

JAVIERA BELÉN RAMÍREZ RODRÍGUEZ

Profesora Guía: Eugenia M. Gayo Hernández

SANTIAGO - CHILE
2024

Agradecimientos

A mamá y papá,
a mis cinco sentidos,
a la escalada como refugio,
a mi red de apoyo,
a la flora y fauna libre,
Al valle que me vio crecer.
Por ellas y ellos,
por mí,
porque algún día corran libres las aguas por las cuencas.

No sabría como retribuirles todo lo que me han entregado; mamá y papá. Esto es solo una pequeña parte.

Gracias por dejarme sentir su amor desde el plano terrenal o desde otras dimensiones:
Marcelo, Gonzalo, Mati, Limarí, Melinao, Mercedes, Emedita, Panchi.

A mi segunda familia del otro lado del mundo: Caroline, Bengt, Olle, Lisa, Elsa, Molly. Jag saknar er mycket.

A mis pilares fundamentales dentro de mis años universitarios, con quienes agradezco haber compartidos llantos, estrés y muchas muchas risas. Espero tenerles largo tiempo en mi vida: Nico, Leo, Diego T, Lucas, Diego, Palo, Hernán, Dani.

A quienes me ayudaron de manera práctica y teórica de forma crítica: Felipe Thomas, Gino Sandoval, Alexis Vasquez, María Christina Fragkou y Eugenia Gayo. También se agradece el apoyo del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2 FONDAP/ ANID 1523A0002.

Resumen

A largo del tiempo, es cada vez más visible el deterioro a nivel ambiental, el cual presenta una multicausalidad en el sentido antrópico sumado a encontrarnos en un contexto de variabilidad climática. Este fenómeno, puede visualizarse desde múltiples disciplinas y perspectivas. Ante esto, surge la interrogante de cómo han evolucionado sectores productivos que dependen críticamente de variables ambientales, particularmente de la disponibilidad del recurso hídrico. Lo cual conlleva a una situación crítica en la zona productiva del centro-norte de nuestro país.

Debido a esto, el presente trabajo se centra en evaluar la trayectoria temporal del estado de los cultivos en el Valle del Limarí antes y después del evento de mega sequía, durante los años 1986, 2007 y 2023. Como base metodológica se analizaron imágenes satelitales en una ventana temporal, permitiendo identificar variaciones en los cultivos de las tierras agrícolas mediante el cálculo de índices espectrales, tales como el NDVI, NDWI y NDDI. En primer lugar, se caracterizaron cambios en el vigor y estrés hídrico dentro de la estructura productiva de la agricultura, analizando cambios en los tres años mencionados. Estos, resultan ser claves para evaluar la respuesta de la agricultura a variaciones estacionales en la disponibilidad de agua y otros factores en periodos pre y post mega sequía. En segundo lugar, se cuantificó el área para comprar el estado de los cultivos, en función de su exposición al evento de mega sequía. En este sentido, la presente memoria proporciona una línea base sobre los cambios dentro de la actividad productiva más importante para la región.

De acuerdo con los resultados obtenidos, sin bien los índices de vigorosidad y estrés hídrico presentan pocas variaciones en el tiempo, al momento de combinar esta información, es posible dilucidar el estado de los cultivos y sus signos de deterioro. En efecto, se encontró que para el año 1986 existía una mayor extensión de cultivos en estados de sequía bajos o muy bajos, mientras que, por el contrario, para 2023 las categorías de sequía alta y muy alta priman en extensión. Sobre esta línea, se permite discutir recomendaciones para el área de estudio, y así promover transformaciones que lleven a disminuir la vulnerabilidad de las comunidades del valle del Limarí.

Palabras claves: Agricultura, análisis temporal, variaciones estacionales, imágenes satelitales, NDVI, NDWI, NDDI.

Índice de contenidos

| | |
|--|----|
| Capítulo 1: Presentación | 6 |
| 1.1 Introducción | 6 |
| 1.2 Planteamiento del problema | 7 |
| 1.3 Estado del arte | 12 |
| 1.4 Área de estudio | 15 |
| 1.5 Objetivos de la investigación | 18 |
| Capítulo 2: Marco metodológico | 18 |
| 2.1 Etapa 1 | 19 |
| 2.2 Etapa 2 | 24 |
| Capítulo 3: Resultados | 26 |
| 3.1 Cambios de vigor y estrés hídrico de los cultivos. | 26 |
| 3.1.1 1986 | 26 |
| 3.1.2 2007 | 30 |
| 3.1.3 2023 | 34 |
| 3.2 Comparación del estado de los cultivos entre años pre y post mega sequía. | 40 |
| Capítulo 4: Discusión | 43 |
| Capítulo 5: Conclusiones | 47 |
| Referencias | 48 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Precipitación Acumulada cuenca del río Limarí entre 1960 y 2023. | 10 |
| Figura 2. Temperatura máxima cuenca del río Limarí entre 1960 y 2023.. | 11 |
| Figura 3. Índice de precipitación- evaporación estandarizado cuenca del río Limarí entre 1960 y 2023..... | 11 |
| Figura 4. Mapa del área de estudio. | 17 |
| Figura 5. Esquema de estructura base de la etapa 1..... | 22 |
| Figura 6. Esquema para el trabajo con NDDI..... | 25 |
| Figura 7. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en el Valle del Limarí para el año 1986..... | 27 |
| Figura 8. Histograma de NDVI en el Valle del Limarí para el año 1986. | 28 |
| Figura 9. Índice de Diferencia Normalizada de Agua en el Valle del Limarí para el año 1986. | 29 |

| | |
|---|----|
| Figura 10. Histograma de NDWI en el Valle del Limarí para el año 1986. | 30 |
| Figura 11. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en el Valle del Limarí para el año 2007..... | 31 |
| Figura 12. Histograma de NDVI en el Valle del Limarí para el año 2007..... | 32 |
| Figura 13. Índice de Diferencia Normalizada de Agua en el Valle del Limarí para el año 2007..... | 33 |
| Figura 14. Histograma de NDWI en el Valle del Limarí para el año 2007..... | 34 |
| Figura 15. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en el Valle del Limarí para el año 2023..... | 35 |
| Figura 16. Histograma de NDVI en el Valle del Limarí para el año 2023..... | 36 |
| Figura 17. Índice de Diferencia Normalizada de Agua en el Valle del Limarí para el año 2023..... | 37 |
| Figura 18. Histograma de NDWI en el Valle del Limarí para el año 2023..... | 38 |
| Figura 19. Evolución de la vigorosidad en el valle del Limarí..... | 39 |
| Figura 20. Evolución del estrés hídrico en el valle del Limarí | 39 |
| Figura 21. Índice de Sequía Normalizado para el Valle del Limarí durante el año 1986 | 40 |
| Figura 22. Índice de Sequía Normalizado para el Valle del Limarí durante el año 2023..... | 41 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Población total de la cuenca del río Limarí | 16 |
| Tabla 2. Etapas de la investigación..... | 19 |
| Tabla 3. Mosaicos utilizados en la investigación..... | 21 |
| Tabla 4. Valores de NDVI | 23 |
| Tabla 5. Valores de NDWI | 23 |
| Tabla 6. Valores de NDDI | 24 |
| Tabla 7. Cuantificación del área del estado de los cultivos. | 42 |

Capítulo 1: Presentación

1.1 Introducción

A nivel global y nacional, la escasez de recursos hídricos tiene un impacto considerable tanto en áreas urbanas como rurales, afectando desde la vida cotidiana hasta la producción agrícola. Según la UNESCO (2023), entre 2000 y 3000 millones de personas enfrentan escasez de agua al menos un mes al año, lo que compromete su seguridad alimentaria y acceso a la electricidad. La Fundación Aquae (2016) advierte que esta problemática se intensificará debido al crecimiento poblacional y el cambio climático, señalando que cerca del 70% del agua se destina a la agricultura, el sector más vulnerable a la reducción en la disponibilidad hídrica. La FAO (2024) añade que los efectos directos de la sequía incluyen una disminución en la productividad agrícola y un aumento en la degradación de tierras y hábitats naturales, lo que repercute significativamente en la vida de las comunidades locales, provocando migraciones, disminuciones en los ingresos de los agricultores y exacerbando la inseguridad alimentaria por el incremento de los precios de los alimentos.

De acuerdo con la Biblioteca del Congreso Nacional (2019), durante 12 años consecutivos las precipitaciones han estado bajo el promedio climatológico, afectando esencialmente a Chile Central, razón por la que este comportamiento histórico se le denomina como “mega sequía”. En este contexto, las principales cuencas de las regiones de Coquimbo, Valparaíso y Metropolitana muestran niveles altos de estrés hídrico entre 1990 y 2020 (Alvarez-Garreton et al., 2023). Este concepto implica, que además de existir una falta de agua dada por un contexto meteorológico, se amplía a que se enfrenta una situación en la cual la demanda de agua supera la cantidad disponible o cuando su uso está restringido por su baja calidad (Alvarez-Garreton et al., 2023). Al respecto, la subsecretaria de Agricultura ha reconocido que la región de Coquimbo, y en especial la provincia del Limarí, enfrenta una situación compleja de escasez hídrica y sequía prolongada, donde el agua embalsada solo llega al 4% (Emol, 2024). Esta provincia destaca por su tradición y aporte agrícola al país lo que la hace aún más vulnerable bajo las condiciones de sequía, afectando no solo a los predios dedicados al crecimiento de cítricos y/o vid de mesa, sino que a las familias económicamente dependientes de este rubro. Como medida de adaptación para enfrentar esta emergencia, desde el gobierno actual se ha planteado la implantación de una planta desaladora, además de otras acciones de distinta envergadura (Ministerio de Agricultura, 2024).

En el contexto de la investigación actual, se evalúa la evolución temporal de la sequía en el valle del Limarí, comparando períodos previos y posteriores a la mega sequía. Este análisis proporciona una visión detallada del impacto de la sequía y la escasez hídrica sobre los cultivos presentes en las tierras agrícolas emplazadas en la cuenca del Limarí, ofreciendo así una base para entender mejor las consecuencias a largo plazo de estos fenómenos climáticos en la región. Para alcanzar los objetivos planteados, se empleará la teledetección como herramienta primordial, reconocida por su eficacia en la adquisición de datos ambientales y fenómenos

territoriales (Sobrinó, 2000). El uso combinado de imágenes satelitales y la aplicación de índices como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI) y el Índice Normalizado de Sequía (NDDI) permitirá una evaluación precisa de la respuesta de los cultivos, presentes en las tierras agrícolas, a la sequía (Ceroni, et al., 2015; Ottoniel de León y Villatoro, 2017; Paredes, et al., 2022).

1.2 Planteamiento del problema

En la actualidad, como sociedad ha sido posible evidenciar una disminución en las precipitaciones y cómo este evento ha afectado en diferente medida diversos sectores productivos del país. En Chile, desde el año 2010, las regiones de Coquimbo y la Araucanía han experimentado un descenso en las precipitaciones, aproximándose a un déficit del 30% (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, 2015). Garreaud, et al. (2019) por su parte mencionan la prevalencia de un dipolo de circulación en el Pacífico, que dificulta el paso de tormentas extratropicales sobre la zona central del país. A esto se le agrega la influencia de ‘forzantes antrópicas del clima’ asociadas a la quema de combustibles fósiles, la tala de bosques o la emisión de gases de efecto invernadero (Alvarez-Garreton et al. 2023). No obstante, en la zona central de Chile, donde el agua fresca superficial constituye la principal fuente de abastecimiento, actualmente se enfrenta a un alto índice de escasez hídrica (Alvarez-Garreton et al. 2023, Bolados et al 2016). En este sentido, la escasez hídrica se define como la insuficiencia de recursos hídricos para satisfacer las necesidades de agua de una población, teniendo en cuenta tanto la disponibilidad como la calidad del agua. Esta situación se caracteriza por un desequilibrio entre la oferta y la demanda de agua, influenciada por factores como la sequía, el uso excesivo y la gestión inadecuada de los recursos hídricos (Alvarez-Garreton et al. 2023). Producto de esto, se configura un escenario de estrés hídrico multidimensional dado por demandas que superan la oferta de recursos hídricos, por lo que es necesario delinear abordajes, soluciones colaborativas y multidisciplinarias, que lleven a la adaptación y mitigación de sus efectos.

Las sequías prolongadas provocan pérdidas económicas (Banco Mundial, 2023), cuyas magnitudes dependen de la capacidad de resiliencia y adaptación del territorio incluyendo por ejemplo disponibilidad de infraestructura para almacenar agua (embalses) o acceso a reservorios naturales de recursos hídricos (acuíferos). En Chile Central entre el 2012 y el 2020 el uso neto de agua disminuyó en un 15,3%, y concomitantemente disminuyó el total de tierras agrícolas en un 13,5% (Fernández, et al., 2023). Lo anterior podría atribuirse a los efectos de la mega sequía que afecta la disponibilidad de agua para riego, impactando directamente la subsistencia de las familias rurales dedicadas a la agricultura, pero además a medianas y grandes empresas agrícolas exportadoras. Precisamente, se ha elevado la preocupación sobre el peligro que impone la sequía sobre una economía relevante para el país, la cual incrementó sostenidamente sus exportaciones en un 8,3% durante el periodo 1990-2015, repercutiendo positivamente en la reducción de la pobreza rural (ODEPA, 2017).

Esta memoria se centra en el valle del río Limarí y los cultivos presentes en sus tierras agrícolas. Esta cuenca hidrográfica abarca 11.800 km² y el desarrollo agrícola ha sido su principal

actividad productiva (Bolados et al., 2016). El manejo del recurso hídrico en el área data de 1928 cuando comenzó la construcción de los tres embalses que permitieron una regulación y manejo del recurso hasta que, como consecuencia del modelo exportador, comenzaron a producirse desequilibrios entre la oferta y demanda de agua (Ferrando, 2002). Si bien el área de estudio se encuentra en una región árida, en este valle se cultivan las mayores extensiones de mandarinas y uva de mesa del territorio nacional. De acuerdo con el último Censo Nacional Agropecuario y Forestal las superficies plantadas para frutales y vid son de 26.319 y 6.928 hectáreas (INE, 2021). En la misma línea, en el catastro frutícola de la región de Coquimbo (ODEPA, 2021), señala que al año 2021, la superficie plantada por comuna en la provincia del Limarí (17.678,5 hectáreas) fue comparativamente mayor a otras provincias de la región como Elqui (6.150,3 hectáreas) y Choapa (3.295,8 hectáreas). Así, el valle del Limarí se ha convertido en un importante polo de producción frutícola tanto regional como nacional, aportando significativamente al producto interno bruto (PIB) silvoagropecuario de Chile (ca. 6,2% del PIB; ODEPA, 2018). En efecto, las colocaciones bancarias netas de la región destinadas solo a la producción silvoagropecuaria en 2020 fueron de \$233.878 millones de pesos, de los cuales 146.040 millones fueron sólo destinados a la actividad frutícola (ODEPA, 2020).

A medida que el valle del Limarí se consolidó como un eje esencial para la producción agrícola de Chile, experimentó cambios estructurales significativos alineados con la expansión de un modelo exportador. Este modelo ha buscado intensificar la producción a gran escala para satisfacer las demandas de los mercados internacionales. Actualmente en la región se producen 324.258,2 toneladas de productos agrícolas, de los cuales el 63,3% son destinados a la exportación (ODEPA, 2021). En este sentido, en el valle del Limarí ha persistido un desequilibrio entre la oferta y la demanda del recurso hídrico asociada a la relación que existe entre la variabilidad climática y la disponibilidad hídrica con los usos de agua (Alvarez-Garretón et al., 2023). Esto ha implicado un abandono de los cultivos tradicionales de hortalizas, siendo reemplazados por el cultivo a gran escala de uva de mesa. Así, en el área de estudio, la transición hacia una agricultura orientada a la exportación ha intensificado la demanda de recursos hídricos, al mismo tiempo que ha contribuido a la pérdida de economías y saberes tradicionales centrados en la diversificación de cultivos (Bolados et al., 2016). Esta situación obedece a la concepción del agua como un recurso ilimitado, lo que agudiza la vulnerabilidad de la población a la escasez hídrica.

De acuerdo con datos históricos de precipitación en el área de estudio para el periodo 1960-1990 (Figura 1), se observan años mayoritariamente clasificados como “normales” e incluso “extremadamente húmedos”. Luego, en el periodo 1990-2010 las condiciones oscilan entre años “normales” a “secos”. Posteriormente, los montos de precipitación acumulada definen un periodo que da cuenta de la mega sequía, caracterizada por años “secos” o “extremadamente secos”. Estas tendencias, se condicen con los cambios observados por el catastro frutícola de la región, advirtiéndose una disminución en la superficie cultivada a partir del año 2021, que ha disminuido en un 0,2% en comparación con el catastro realizado en el 2018. El escenario que presenta la cuenca se debe en parte a un marcado déficit en sus caudales, con una reducción

promedio del 70% durante el periodo de 2010 a 2014. Esta situación se atribuye a una significativa disminución en las precipitaciones, que cayeron por debajo de los 200 mm anuales (Figura 1). En efecto, este periodo es clasificado como extremadamente seco (<300 mm/anuales), el cual se condice con un aumento en la altura de la línea de nieve y la reducción dramática de los niveles en el embalse La Paloma y el nivel freático del pozo Alfalfares (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, 2015). La situación del embalse y el pozo Alfalfares es crítica, ya que ambos representan las principales reservas para el agua de riego y durante la última década sus niveles se encuentran bajo sus mínimos históricos (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, 2015).

Aparentemente la escasez hídrica en ambos sistemas de riego se relaciona además con el incremento en las temperaturas máximas. El análisis histórico revela que hasta 1990, las condiciones climáticas de la cuenca eran predominantemente "normales", "frías" o "muy frías". Posteriormente, y hasta el 2010, las temperaturas se mantuvieron alrededor de los 18°C, calificándose como "normales". Desde 2010, sin embargo, se observa una marcada tendencia hacia una década "muy cálida" (Figura 2). Este incremento de temperatura ha resultado en una mayor evaporación de aguas superficiales y un derretimiento anticipado de la nieve, reduciendo la disponibilidad hídrica en los meses más cálidos. En efecto, en los últimos cinco años, la cuenca ha experimentado predominantemente condiciones de "sequía" y "sequía severa", como se muestra en la Figura 3. Esto se atribuye a un índice de precipitación- evaporación estandarizado negativo, que ha pasado de reflejar años "normales" y "húmedos" entre 1970 y 1990 a una tendencia progresiva hacia condiciones más áridas hasta el 2010. En resumen, basándonos en los datos climatológicos disponibles, se puede concluir que la cuenca experimentó un periodo próspero en términos de disponibilidad hídrica favorable para la agricultura desde 1970 hasta 1990, lo que corresponde a una fase previa a la mega sequía. Sin embargo, con el tiempo, los indicadores de precipitación, temperatura y los índices de sequía han sido influenciados notablemente por el evento de mega sequía, alterando significativamente el panorama y restringiendo cada vez más el acceso al principal recurso para la agricultura en años recientes.

En adición a los impactos de la mega sequía sobre la disponibilidad de agua en la cuenca, se suma un desafío de gestión hídrica. Según Ferrando (2002), en el valle la demanda de agua ha crecido constantemente, lo cual es percibido por la opinión pública como una amenaza significativa que pone en riesgo la sostenibilidad de la agricultura. Este escenario plantea la posibilidad de un colapso, a menos que se implementen nuevas soluciones para la gestión del agua (Congreso ACADES, 2024). Es importante considerar que este evento no es meramente transitorio, sino como un cambio permanente que requiere de acciones de adaptación y aprendizaje tanto en la vida cotidiana como en las actividades productivas. Entonces, resulta urgente gatillar cambio de prácticas que explícitamente consideren los equilibrios hídricos en un contexto ambiental árido y de megasequía, donde la agricultura debe plantearse de forma sustentable. El valle del Limarí demuestra que el modelo exportador actual difícilmente podrá mantenerse sin transformaciones que consideren tanto el bienestar humano como medio ambiental, lo que incluye también los necesarios ajustes institucionales.

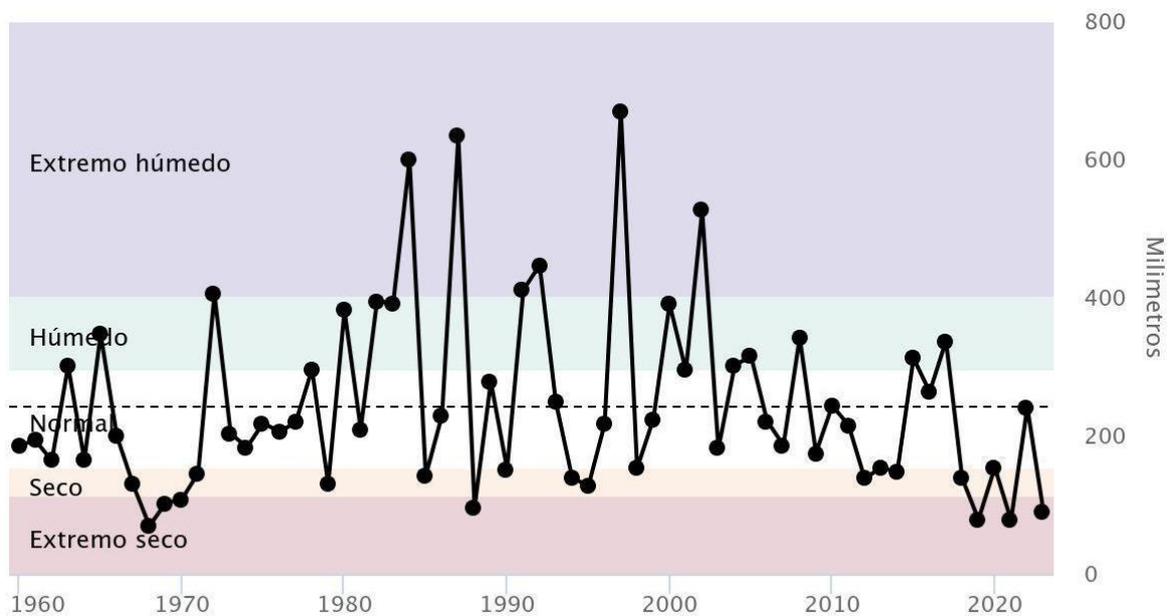


Figura 1. Precipitación Acumulada cuenca del río Limarí entre 1960 y 2023. La definición de extremos de precipitación acumulada se toma de la plataforma Sequía y Seguridad Hídrica en Chile, donde bajo los 200 mm se considera como una cuenca con año “seco” o “extremo seco”. Por sobre dicho valor y hasta los 400 mm, es considerado como un año “húmedo”, seguido por la categoría “extremo húmedo” cuando los milímetros precipitados superan los 400 mm.

Fuente: Plataforma *Sequía y Seguridad Hídrica en Chile*, Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2 (2023).

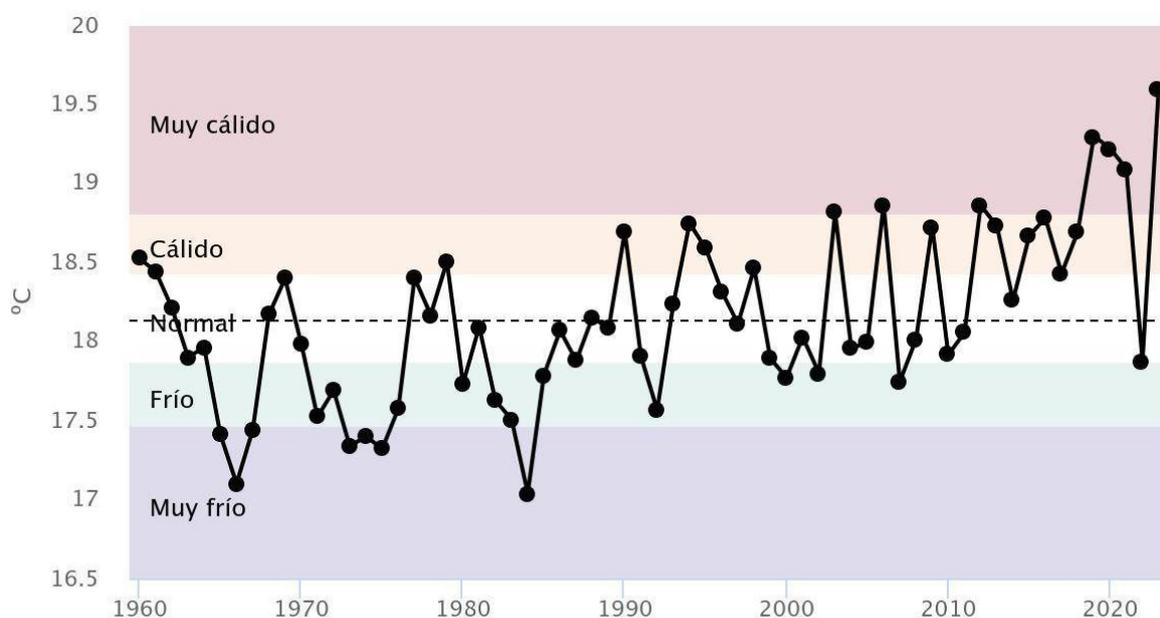


Figura 2. Temperatura máxima cuenca del río Limarí entre 1960 y 2023. Los años “muy cálidos” son definidos por la plataforma Sequía y Seguridad Hídrica en Chile, cuando la temperatura media anual máxima supera los 19°. Seguidamente, un año “cálido” se contempla con temperaturas entre los 19° y 18,5°. Para que un año sea denominado como “normal”, es necesario que su temperatura media máxima sea de 18°, seguidamente para años catalogados como “frío” y “muy frío”, dicha temperatura debe bajar hasta los 17° y 16,5° respectivamente.

Fuente: Plataforma *Sequía y Seguridad Hídrica en Chile*, Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2 (2023).

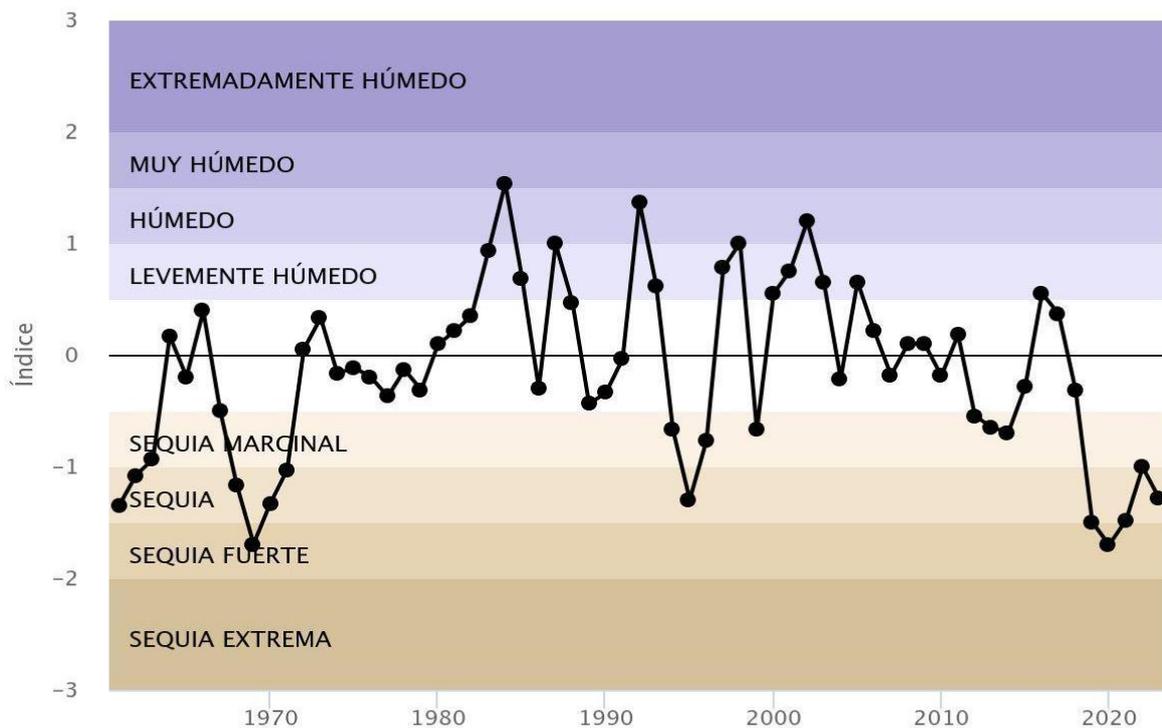


Figura 3. Índice de precipitación-evaporación estandarizado cuenca del río Limarí entre 1960 y 2023. El presente índice, de acuerdo con la plataforma de Sequía y Seguridad Hídrica en Chile, tiene valores negativos para aquellos años que presentan desde “sequía marginal” y “sequía” (valor -1) hasta “sequía fuerte” (valor -2) y “sequía extrema” (valor -3). Por otro lado, los valores positivos significan años “levemente húmedo” y “húmedo” para valores 1, “muy húmedo” para valores 2 y “extremadamente húmedo para valores 3.

Fuente: Plataforma *Sequía y Seguridad Hídrica en Chile*, Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2 (2023).

Ante la problemática, la presente investigación busca explorar cómo se han manifestado la mega sequía y la escasez hídrica en el valle de Limarí, sobre los cultivos. Así, se evalúan sus

cambios en estrés hídrico y vigorosidad en el tiempo, así como también su estado en términos de salud fotosintética, productividad y respuesta a condiciones de sequía. Esto permitirá comprender cómo los cultivos presentes en las tierras agrícolas han respondido a las variaciones climáticas.

1.3 Estado del arte

Con el fin de comprender mejor el contexto que se vive en el valle del Limarí, es fundamental examinar la literatura y conceptos que guiarán la investigación en base a estudios realizados.

En primer lugar, de acuerdo con la UNESCO (2021), el agua es un recurso único e insustituible al ser el motor de la vida, las sociedades y las economías. Calcular su disponibilidad y variaciones es esencial para controlar el suministro de alimentos, la producción energética y la salud tanto humana como ambiental (Lozano-Parra, 2018). Alvarez-Garreton et al (2023) menciona que la disponibilidad hídrica depende de las condiciones climáticas y geográficas de una región. Este factor es fundamental para comprender la seguridad hídrica, definida como la capacidad de una comunidad para gestionar y mantener volúmenes adecuados de agua (ONU, 2013). Esta capacidad asegura la preservación de ecosistemas, satisface el uso humano, y sustenta el desarrollo socioeconómico (ONU, 2013). En este contexto, la seguridad hídrica puede verse influenciada por condiciones climáticas adversas, como sequías, repercutiendo directamente en actividades humanas relacionadas con el agua, como la agricultura, la salud pública y la disponibilidad de agua potable.

Desde 2010 en diferentes regiones de Chile central se presentan condiciones de sequía y escasez hídrica (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, 2019). Si bien la primera se caracteriza por una disminución en las precipitaciones en relación a las estadísticas históricas, la segunda se posiciona como un concepto complejo que se produce cuando el agua disponible es menor a su demanda. En efecto, la escasez hídrica depende de las decisiones tomadas en relación con los usos del recurso hídrico. Bolados et al. (2016) han caracterizado las tensiones socioambientales generadas a partir de la escasez hídrica en el valle del Limarí. De acuerdo con este estudio, la escasez hídrica es la incapacidad de una cuenca de satisfacer por completo la demanda hídrica, aun cuando no haya un déficit en la oferta. Por lo tanto, la escasez necesariamente no requiere una sequía meteorológica.

En cuanto a la oferta hídrica, esta se refiere a la cantidad de agua que, luego de haber precipitado, escurre por los ríos y corrientes superficiales además de alimentar lagos, lagunas y reservorios, es decir la disponibilidad hídrica asociada a estos eventos. Esta, busca satisfacer la demanda hídrica y todo uso de agua -i.e., las necesidades de los seres humanos (Alvarez-Garreton et al. 2023). En la misma línea, bajo futuros escenarios climáticos adversos se proyectan cambios importantes en la disponibilidad y/o oferta hídrica en el Norte Chico y Chile central, los cuales conllevarían a niveles permanentes de estrés hídrico altos y extremos en las cuencas de los ríos Elqui, Limarí, Petorca/La Ligua, Aconcagua y Maipo (Alvarez-Garreton et al. 2023). Lo anterior, necesariamente se amplificará si la presión antrópica por dicha oferta

sigue aumentando en el tiempo, especialmente en aquellas cuencas con mayor riesgo de escasez hídrica y donde los niveles de los acuíferos han sido significativamente reducidos para satisfacer las demandas de la minería, agricultura y consumo doméstico (Alvarez-garretón et al 2023; Alvarez-garretón et al 2024).

En el contexto del área de estudio, la trayectoria histórica de la mega sequía aparentemente agudizará la crisis hídrica en el mediano y largo plazo. Bolados et al (2016) concluyen que la estabilidad histórica entre la comunidad y su ambiente se ha visto afectada ya que el territorio no ha sido capaz de soportar la demanda de la expansión de la industria agroalimentaria que hoy en día se ve obstaculizada dada la intensificación de la escasez hídrica en el sector. En la misma línea, de acuerdo con Ferrando (2002), en el valle del Limarí ha existido un desequilibrio entre la oferta y la demanda de agua, mientras que la primera se reduce bajo las tensiones del cambio climático junto con el desarrollo de un modelo exportador, la segunda parece aumentar progresivamente.

Conforme a los datos disponibles para las cuencas del Limarí y Choapa (<https://anidlimarichoapa.ciren.cl>) se observan diferencias estacionales en la oferta-demanda. Por ejemplo, durante los meses junio-julio se registra la menor disponibilidad hídrica, mientras que los meses estivales (diciembre-enero) se caracterizan por mayor disponibilidad y uso. Por su parte, las tendencias observadas a partir de los registros históricos de caudales (2000-2024) dan cuenta de descenso sostenido. Esta evidencia indica que la estacionalidad en la disponibilidad de agua y su trayectoria a largo plazo deben ser elementos claves para planificar el manejo de los recursos hídricos, especialmente dentro de un contexto de mega sequía. Esto implica que el uso de recursos debiese limitarse a los sectores y estaciones del año en que la oferta es suficiente, es decir, durante el periodo lluvioso o el periodo de deshielo. Al respecto, la presente investigación busca contribuir al conocimiento cuantitativo de estos peak de caudal, examinando su relación con la evolución y estado de las tierras de cultivos del valle, especialmente para años considerados dentro de periodos pre y post mega sequía.

En el valle ha ocurrido un evidente aumento en la cantidad de hectáreas que requieren riego, motivado por la adopción de prácticas agrícolas orientadas a satisfacer demandas extranjeras. Este cambio en la matriz ha llevado a priorizar cultivos comercialmente más atractivos, lo que ha llevado a abandonar el cultivo diversificado de hortalizas (Robles, 2003). La integración de la economía chilena al mercado internacional, aunque expandió la frontera agraria y la superficie cultivada, también generó una modernización tecnológica desigual (Robles, 2003). Este proceso estuvo marcado por la mecanización selectiva y la expansión del sistema de regadío, situaciones en las que los terratenientes se concentraron en monopolizar los cultivos de alta importancia comercial, tales como la viticultura y la fruticultura. En este sentido, Robles (2003) sostiene que la inserción de la economía chilena al mercado internacional amplió la frontera agraria y expandió la superficie cultivada. Al respecto, el autor menciona que también hubo lugar para una modernización tecnológica desigual donde destacaron procesos de mecanización selectiva y extensión del regadío, donde terratenientes monopolizaron los cultivos de mayor importancia comercial, priorizando la viticultura y fruticultura. En efecto, este proceso no fue desarrollado de forma homogénea, denotando diferencias tanto en el

universo de productores como en los territorios en que existe actividad agropecuaria y forestal (ODEPA 2023). Esto explica, en parte, la desigualdad actual que existe en el valle, de acuerdo con la tenencia de tierras y los derechos de agua que se encuentran concentrados en pocos propietarios (Bolados et al., 2016) llevando a que quienes carecen de estos, se vean obligados a dejar el rubro primero.

Aunque se reconocen las consecuencias del cambio en el modelo económico y su impacto en los cultivos, aún no se ha evaluado cómo han evolucionado las tierras de cultivos a través del tiempo. Esta información es importante para la toma de decisiones estratégicas respecto al manejo de las hectáreas cultivables, permitiendo identificar qué sectores presentan condiciones óptimas y en cuáles enfrentan desafíos importantes considerando la actual crisis hídrica.

El análisis del estado de los cultivos puede enfocarse considerando la interacción entre las condiciones hídricas y climáticas de la región. De acuerdo con (Quispe y Révolo, 2020), un “estado de la vegetación” busca una evaluación y descripción del medio ambiente vegetal, que puede lograrse a través de imágenes satelitales, mediante índices de vegetación. Logrando determinar vigor, densidad, estrés hídrico y la influencia de la temperatura. Según la FAO (2021), este análisis comprende una variedad de datos que incluyen la biomasa, la salud del suelo, la disponibilidad de agua, la biodiversidad, así como los servicios económicos y culturales proporcionados por los cultivos. Esta metodología integral facilita una evaluación precisa y adaptada al contexto específico de la sostenibilidad agrícola. Complementando esta aproximación, según Campaña-Olaya (2021), la vegetación bajo estrés, como la sequía, muestra una pérdida de vigor que lleva a la cubierta vegetal y los cultivos a un estado de vulnerabilidad, aumentando su susceptibilidad a plagas y enfermedades (INIA, 2020). De forma similar, Pathil et al. (2024) destacan que la sequía afecta las características fisiológicas y morfológicas de las plantas, incluyendo cambios en la reflectancia de los cultivos en bandas como NIR (Infrarrojo cercano) y SWIR (Infrarrojo de onda corta), que son sensibles a la clorofila y al agua. Estos cambios en la condición hídrica de las plantas resultan en variaciones en la concentración de pigmentos en las hojas, alterando así su vigor y salud. Por ende, la presente investigación emplea la vigorosidad y humedad como indicadores claves para evaluar el estado de los cultivos en respuesta a la mega sequía en el área de estudio. Caracterizando, en primer lugar, cada uno de estos indicadores, metodológicamente aplicando índices espectrales como el NDVI y el NDWI. Para en segundo lugar, ser complementados con el objetivo de comparar y cuantificar el estado de los cultivos, empleando el índice NDDI.

Considerando la definición anterior, en este trabajo se aplican técnicas de teledetección, enfocándose específicamente en el uso de índices espectrales que permiten evaluar condiciones fisiológicas de la vegetación, las cuales pueden estar influenciadas por factores ambientales. De acuerdo con Paredes (2022), el Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) es uno de los más utilizados. Utiliza las bandas de Infrarrojo Cercano y Rojo tomando valores entre -1 y 1, donde los negativos pueden estar asociados al agua, los cercanos a 0 a superficies escasamente vegetadas con poco vigor y los cercanos a 1 a vegetación densa y vigorosa. En la misma línea, Morales, et al. (2007), mencionan que este índice es bastamente utilizado para caracterizar el estado fotosintético de la vegetación, ya que utiliza dos bandas espectrales donde se pueden

ver claras diferencias entre vegetación sana, vigorosa y con alto rendimiento y la vegetación enferma o senescente.

Por otro lado, el Índice de Agua Normalizado (NDWI), de acuerdo con Dobri, et al (2021) también cuenta con una basta utilización en la agricultura de precisión. Utiliza las bandas del Infrarrojo Cercano e Infrarrojo de Onda Corta, midiendo el contenido de agua en las hojas, por lo cual es utilizado para detectar y controlar la humedad de los cultivos. Sus valores entre -1 y 0 indican desde áreas sin vegetación a áreas con estrés hídrico, y valores más altos indican un mayor contenido de agua.

Por su parte, el Índice Normalizado de Sequía (NDDI) es una herramienta valiosa y confiable para evaluar la gravedad de la sequía por sobre el estado de los cultivos (Dobri, et al., 2021). Este índice combina información entregada por NDWI y NDVI para proporcionar una visión integral del impacto de la sequía en los cultivos. Un NDDI positivo indica que los cultivos están significativamente afectados por la sequía, donde precisamente los valores de NDVI y NDWI son bajos. Mientras que un NDDI negativo sugiere que las plantas presentan una baja afectación, presentando valores positivos tanto de NDVI como de NDWI (Salas-Martínez, et al., 2023). De esta manera, el NDDI facilita el análisis del estado, distribución y la intensidad de la sequía, permitiendo una mejor gestión y toma de decisiones en la agricultura.

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, no se encontraron estudios que muestren, analicen o comparen índices como el NDVI, NDWI o NDDI en el área de estudio de la presente investigación. En la misma línea, no se han encontrado aplicaciones específicamente de NDDI en Chile. Por lo tanto, el trabajo presentado aquí, ante la utilización de los índices mencionados, se posiciona como una contribución pionera en este ámbito.

1.4 Área de estudio

El valle del Limarí se ubica en la región de Coquimbo. Esta región está ubicada en una zona semiárida, que de acuerdo con la clasificación Köppen, corresponde a una zona climática dominada por un clima semiárido templado con lluvias invernales (BSks) (Cáceres, 2021). Se encuentra al sur del desierto de Atacama y su área total significa el 5,3% del territorio nacional (Novoa y López, 2001).

Esta región es conocida por sus valles fluviales transversales que irrumpen la fisiografía de una depresión intermedia, que es común en el resto del país. Las principales cuencas corresponden a los ríos Elqui, Limarí y Choapa, de las cuales nacen las 3 provincias de la región junto a 15 comunas (Novoa y López, 2001). Las comunas que componen la cuenca en estudio son Combarbalá, Monte Patria, Ovalle, Punitaqui y Río Hurtado, siendo Ovalle la principal localidad y con mayor cantidad de población (Tabla 1).

| Nombre Asentamiento | Población Total 2002 | Población Total Urbana 2002 | Cauce asociado a Localidad |
|---------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Ovalle | 98.089 | 73.790 | Río Limarí |
| Monte Patria | 30.276 | 13.340 | Río Mostazal |
| Combarbalá | 13.483 | 5.494 | Río Cogotí |
| Punitaqui | 9.539 | 3.615 | Estero Punitaqui |

Tabla 1. Población total de la cuenca del río Limarí

Fuente: DGA. (2004)

El río Limarí nace en la cordillera de Los Andes transportando un caudal medio de 7,34 m³/s y abarca una superficie aproximada de 11.800 km² (DGA 2020). Sus principales afluentes son el río Grande, río Hurtado y el río Cogotí. La cuenca está regulada por tres embalses; Paloma, Recoleta y Cogotí que en su conjunto se denominan el Sistema Paloma y poseen una capacidad máxima de almacenamiento de 1000 millones de m³ destinados a distribuir el recurso para abastecer 48000 has de regadío (Ferrando, 2002 en Parga et al., 2006).

El área de estudio se encuentra bajo la influencia de un clima árido y seco con sequías que pueden llegar a extenderse durante todo el año exceptuando los meses de invierno. En la cuenca se presentan tres tipos climáticos; el semiárido con nublados abundantes que se presenta a lo largo de toda la costa, el semiárido templado con lluvias invernales ubicado en el valle del río donde la evaporación es superior a la precipitación y el clima semiárido frío con lluvias invernales ubicado en la Cordillera de los Andes sobre los 3000 msnm con altas precipitaciones, temperaturas bajas y nieves que significan un aporte durante el periodo estival (DGA, 2017).

En la cuenca, el movimiento vertical del aire es limitado, provocando baja generación de precipitaciones. El Sistema Limarí recibe en promedio 90 mm de precipitación por el norte y 280 por el sur, sin embargo, durante los últimos años se ha experimentado una tendencia negativa en precipitaciones de -25 mm/década. Es en las áreas sobre los 1000 m de altitud donde ocurren la mayoría de los eventos de precipitación alcanzando tasas anuales sobre los 500 mm en períodos lluviosos (DGA, 2020). La cuenca del río Limarí es de régimen nivopluvial, ya que en su cabecera predomina un claro régimen nival, sin embargo, en la parte baja la influencia de un régimen pluvial se vuelve predominante hasta antes de su desembocadura (DGA, 2004), lo que provocaría dos momentos anuales en donde los caudales de los ríos deberían subir; en invierno por aportes pluviales y en primavera-verano debido a los aportes hídricos por derretimiento de nieve en las altas cumbres. Ambas estaciones serán estudiadas en la presente investigación.

En cuanto a los usos de suelo, el valle del río Limarí es el más importante en términos agrícolas del norte chico, ya que con sus aguas se riegan más de 70.000 ha en donde destaca la actividad hortícola, frutales, viñas y vides para uva de mesa. El suelo agrícola comprende 80.011 ha equivalentes al 7% de la superficie total, los cuales se concentran en el sector de la ciudad de

Ovalle y aguas abajo hasta el estero Punitaqui. El uso urbano alcanza las 396 ha, siendo en Ovalle donde se concentra el 77% de la población total urbana de la cuenca. En cuanto al uso minero, este es de tamaño reducido, pero de gran significancia económica extrayendo principalmente cobre, plata y lapislázuli. En el área forestal, este no se presenta en el área de estudio. (DGA, 2017)

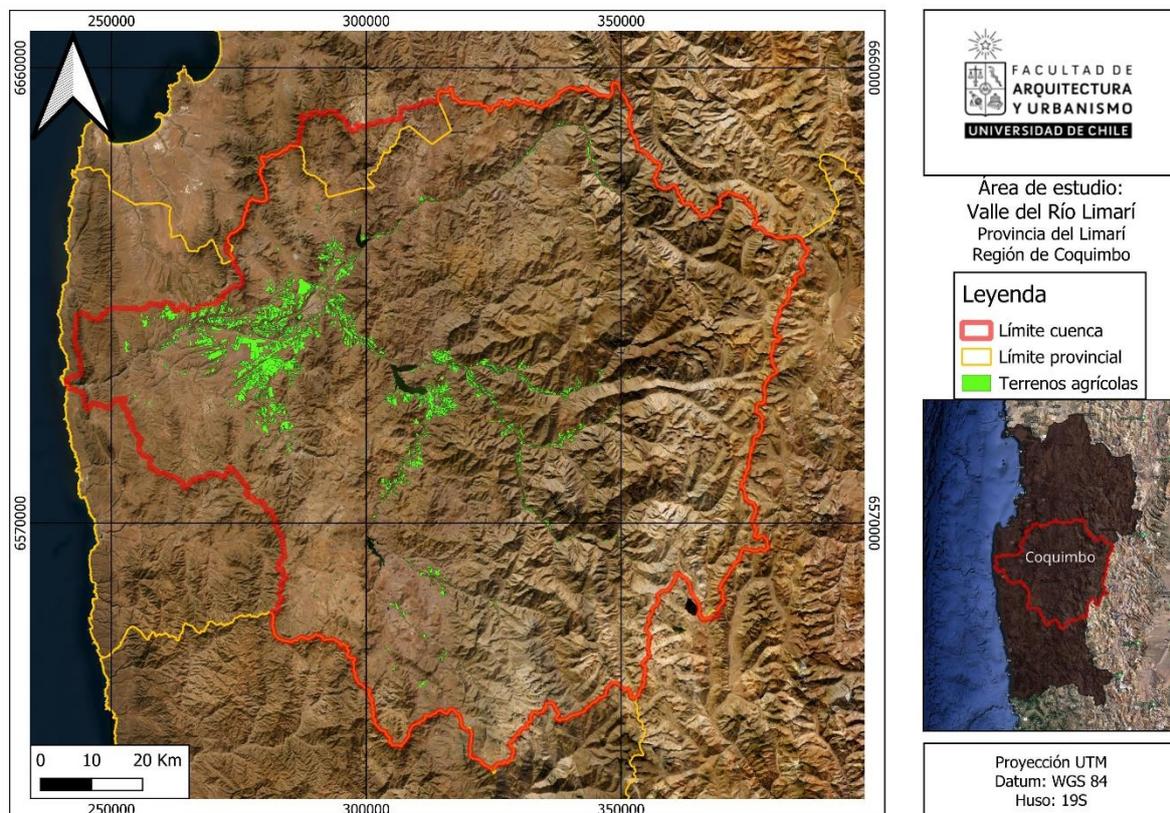


Figura 4. Mapa del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia en base datos CIREN (2023).

1.5 Objetivos de la investigación

Objetivo General: Evaluar la trayectoria temporal del estado de los cultivos en el valle del Limarí antes y después del evento de mega sequía.

Objetivos específicos

- 1) Caracterizar cambios en vigor y estrés hídrico de los cultivos presentes en el valle del Limarí a través de los años 1986 – 2007 – 2023.
- 2) Cuantificar la extensión areal y comparar los cambios en el estado de los cultivos en el valle del Limarí entre años pre y post mega sequía

Capítulo 2: Marco metodológico

Para la presente investigación, se utilizó una metodología de carácter mixto para abordar de la forma más integral el objetivo general. Así, esta investigación involucró trabajo de revisión bibliográfica que proporcione bases conceptuales y teóricas, como también contexto para el análisis del manejo de imágenes satelitales. Pero, además, para aportar recomendaciones derivadas de la discusión de los resultados obtenidos

De esta manera, el procedimiento metodológico consta de 2 etapas, las cuales han sido estratégicamente diseñadas para abordar los objetivos específicos propuestos (Tabla 2)

| Etapa | Objetivo | Método | Herramientas | Producto |
|-------|--|--|--|--|
| 1 | Caracterizar cambios en el vigor y estrés hídrico de los cultivos del valle del Limarí a través del tiempo | <ul style="list-style-type: none">- Análisis de mosaicos de imágenes satelitales- Procesamiento de mosaicos- Cálculo de índices NDVI y NDWI para los años de estudio | <ul style="list-style-type: none">- Google Earth Engine- Qgis | <ul style="list-style-type: none">- Cartografías de NDVI y NDWI para cada año de estudio y periodo de estudio- Histogramas y estadísticas de distribución de pixel- Gráficos de las estadísticas |
| 2 | Cuantificar la extensión areal y comparar los cambios en el estado de los cultivos del valle del | <ul style="list-style-type: none">- Cálculo de NDDI para los años de estudio | <ul style="list-style-type: none">- Google Earth Engine- Qgis | <ul style="list-style-type: none">- Cartografías de NDDI |

| | | | | |
|--|--|---|--|--|
| | Limarí entre años pre y post megasequía. | -Reclasificación de valores raster - Vectorización de ráster | | -Tabla comparativa de categorías de NDDI |
|--|--|---|--|--|

Tabla 2. Etapas de la investigación

Fuente: Elaboración propia

2.1 Etapa 1: Caracterizar cambios en el vigor y estrés hídrico de los cultivos del valle del Limarí a través del tiempo.

Para la primera etapa, se realizó una exploración al software online Google Earth Engine (GEE) para conocer su factibilidad y potencial uso en la investigación. Dentro de este primer acercamiento a la plataforma, fue necesario generar un archivo shape del área de estudio en el Software Qgis, para luego importarlo a GEE y así automatizar la búsqueda de imágenes que coincidan con el área de estudio. Debido a los múltiples comandos y herramientas incorporadas en GEE (Turpo Cayo, 2018 en Aldás, 2019), fue posible generar gran parte de los análisis requeridos para identificar los cambios en vigor y estrés hídrico de los cultivos en la cuenca de estudio. Este análisis incluyó la selección de imágenes, área de estudio, bandas de la imagen, porcentaje de nubosidad y cálculo y extracción de datos.

Como resultado de lo anterior, fue posible utilizar imágenes satelitales Landsat, las cuales presentan adecuada resolución temporal y espacial para reconstruir coberturas de suelo. Sin embargo, considerando las características topográficas y geográficas del área de estudio, fue necesario generar mosaicos de imágenes satelitales, es decir, la unión de 4 imágenes satelitales para lograr cubrir la totalidad del área de estudio. Así, se evaluaron cambios en una ventana temporal entre los años 1986 y 2023. Este primer año, se seleccionó porque los datos disponibles de precipitación, temperatura y evaporación (Figuras 1, 2 y 3) evidencian un periodo previo a la mega sequía, y se cuentan además con las primeras imágenes de calidad para el área de estudio. Se exploraron, además, patrones durante un intervalo intermedio (2004 o 2005) entre los años extremos aquí considerados. No obstante, este procedimiento se vio dificultado, ya que no fue posible encontrar imágenes suficientes para 2004 o 2005. Para subsanar esta limitante, se navegó por las imágenes que GEE ofrece en su catálogo, optando por trabajar con el año 2007, ya que se cuentan con imágenes de calidad sin dilatar de forma significativa la fecha inicial. Para este año, el mosaico se consiguió generar con imágenes del mes de septiembre para la estación primavera-verano, no encontrando suficientes tomas dentro de los meses noviembre-diciembre. Finalmente, el año que cierra la ventana de tiempo corresponde al 2023, que de acuerdo con los registros históricos (Figura 1, 2 y 3), pertenece a un periodo donde indudablemente la sequía ha estado presente. Además, son las imágenes más actuales del área de estudio.

Las imágenes encontradas para cada año de estudio corresponden a las misiones Landsat 5 para los años 1986 y 2007. Mientras que para 2023 se utilizó Landsat 9. Ambas misiones equipadas con los sensores TM y OLI-2/TIRS-2 respectivamente, útiles en aplicaciones como discriminación de suelo y vegetación, discriminación de cultivos, contenido de biomasa, determinación de agua en el suelo y vegetación, entre otras (Aldas, 2019). Agregado a las cualidades anteriores, de acuerdo con la USGS (2018) la colección de nivel 1 (“T1” en código de la Tabla 3) de imágenes Landsat cumplen con criterios de calidad en cuanto a correcciones geométricas y radiométricas, mientras que en la página oficial de GEE se especifica que dicho nivel de imágenes también cuenta con correcciones atmosféricas. Por consiguiente, las imágenes utilizadas en la presente investigación cuentan con los parámetros necesarios para su utilización inmediata.

En la práctica, se generaron un total de 6 mosaicos para la línea de tiempo 1986-2023 sobre los cuales se aplicaron análisis de teledetección. Aplicando, en primer lugar, un filtro de nubosidad el cual permita obtener imágenes lo más nítidas posibles, evitando el ruido que genera la cobertura de nubes en los análisis posteriores (Tabla 3). Este filtro es consistente con la variable periódica de las imágenes, pues para cada año se intentó disminuir al máximo este ruido, optimizando la cantidad necesaria de imágenes para completar los mosaicos. El número total de mosaicos generados obedece a la necesidad de evaluar cambios conforme a las variaciones estacionales en el régimen hidrológico de la cuenca. En este sentido, se buscó capturar el impacto del peak de caudal que ocurre durante el invierno (julio-agosto) dado por aportes pluviales, pero además del peak de caudal asociado al derretimiento de nieve durante la primera-verano (noviembre-diciembre).

| Satélite | Sensor | Código | Año | Meses | Filtro de nubosidad (%) |
|-----------|--------|--|------|---------------------|-------------------------|
| Landsat 5 | TM | ee.ImageCollection(“LANDSAT/LT05/C02/T1_L2”) | 1986 | Julio-Agosto | 15 |
| Landsat 5 | TM | ee.ImageCollection(“LANDSAT/LT05/C02/T1_L2”) | 1986 | Noviembre-Diciembre | 5 |
| Landsat 5 | TM | ee.ImageCollection(“LANDSAT/LT05/C02/T1_L2”) | 2007 | Julio-Agosto | 11 |

| | | | | | |
|-----------|--------------|--|------|---------------------|----|
| Landsat 5 | TM | ee.ImageCollection(“LANDSAT/LT05/C02/T1_L2”) | 2007 | Septiembre (*) | 20 |
| Landsat 9 | OLI-2/TIRS-2 | ee.ImageCollection(“LANDSAT/LC09/C02/T1_L2”) | 2023 | Julio-Agosto | 5 |
| Landsat 9 | OLI-2/TIRS-2 | ee.ImageCollection(“LANDSAT/LC09/C02/T1_L2”) | 2023 | Noviembre-Diciembre | 10 |

Tabla 3. Mosaicos utilizados en la investigación. (*) indica mosaico generado con imágenes del mes de septiembre debido a la falta de imágenes disponibles para completar la estación de primavera-verano 2007.

Fuente: Elaboración propia

Seguidamente, para generar una caracterización específica de los cultivos, se procedió a recortar las imágenes, de forma que se le aplicó un procesamiento denominado “Extracción por máscara” en base al shape facilitado por CIREN (2023) de “Cobertura y uso de suelo, Cuencas del Río Limarí y del Río Choapa”. De esta manera, el mosaico completo de la cuenca fue recortado en base al uso de suelo “Tierras de cultivo” donde se pueden identificar los usos actuales de las tierras tales como: Cultivos anuales, Frutal, Viña y parronal, Hortalizas, Zonas agroindustriales, Otros usos agrícolas, Parcelación y Pradera artificial. Por lo que fue necesario limpiar la base datos de las últimas tres categorías mencionadas. Pues ante una revisión de las imágenes satelitales, dentro de estas categorías no pudo evidenciarse un claro desarrollo agrícola como en los otros usos mencionados. El detalle de estos, es posible visualizarlo a escala regional, provincial o comunal en un visor desarrollado por CIREN (2021) en su página web denominado “Terrenos agrícolas”.

A continuación de lo anteriormente descrito, se aplicaron análisis de teledetección. Así, se aplicaron índices NDVI y NDWI sobre las tierras de cultivo por cada año. Al agregar la variable estacional de los peak de caudal a estudiar, se obtuvo un total de 12 mosaicos (Figura 5). Los cuales permitieron identificar cambios en vigor y estrés hídrico de los cultivos presentes en el valle del Limarí para los años 1986 – 2007 - 2023.

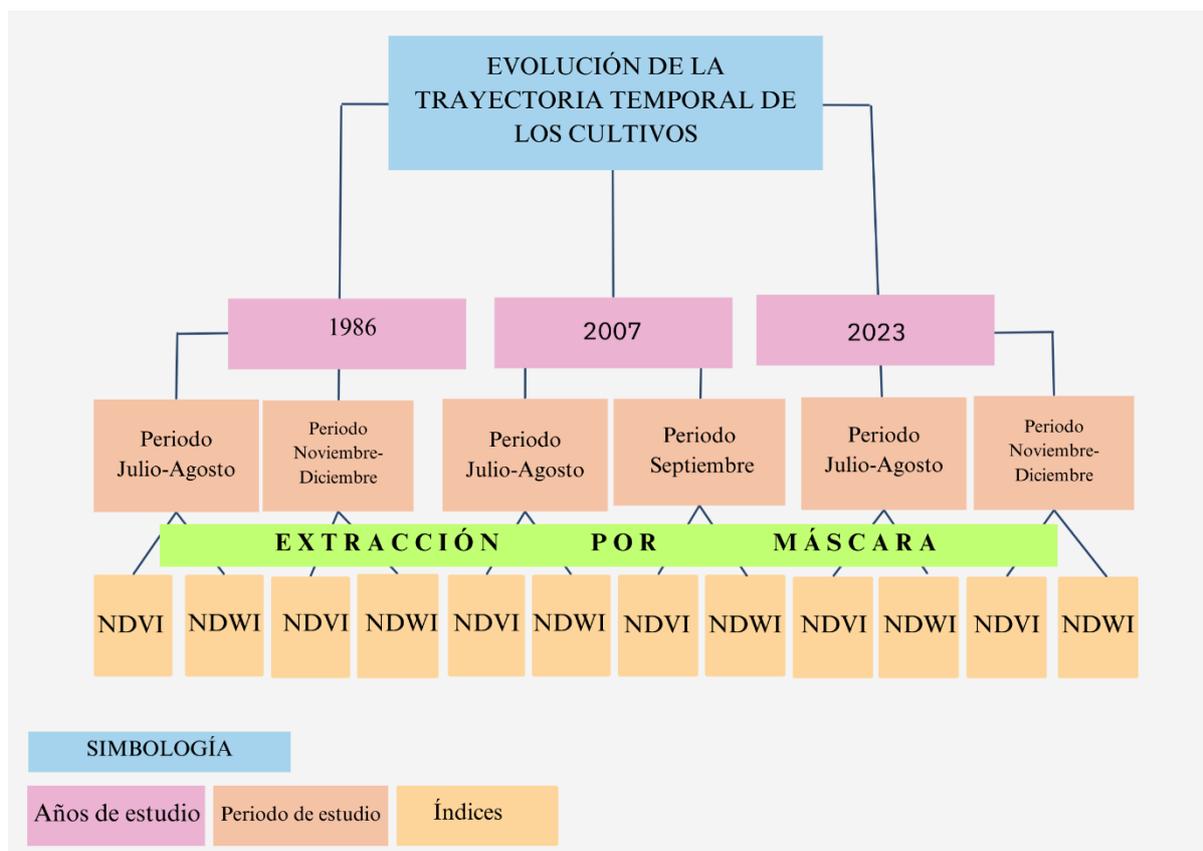


Figura 5. Esquema de estructura base de la etapa 1. Se muestran los años seleccionados, los periodos de estudio y los índices aplicados para cada uno de estos.

Fuente: Elaboración propia.

Para medir el verdor, la densidad y la calidad de la vegetación se utilizó el NDVI, el cual se calcula mediante la diferencia entre la reflectancia de la banda roja y la banda del infrarrojo cercano dividido por la suma de estas dos bandas (Ecuación 1). Su valor varía entre los valores -1 y 1 (Sánchez et al., 2016 en Aldás, 2019) donde sus valores negativos pueden estar asociados al agua o a sectores sin vegetación, los cercanos a 0 a superficies escasamente vegetadas con poco vigor y los cercanos a 1 a vegetación densa y vigorosa (Paredes, et al. 2022). Al respecto, mientras mayor sea el contraste entre la reflectancia de las bandas infrarroja y roja, mayor será el vigor de la vegetación en la cubierta observada (Cabezas, et al. 2007; Gómez, 2005).

A continuación, la tabla de rangos y ecuación utilizada.

| Rango | Descripción |
|-----------|------------------------------------|
| < 0,1 | Sin vegetación |
| 0,1 – 0,2 | Vegetación ligera, poco vigor |
| 0,2 – 0,4 | Vegetación media, vigor intermedio |
| > 0,4 | Vegetación densa, muy vigorosa |

Tabla 4. Valores de NDVI

Fuente: Gómez (2005)

En el caso de las imágenes Landsat 5, las bandas de reflectancia utilizadas son la 3 para el rojo y 4 para el infrarrojo cercano. Asimismo, para las imágenes de Landsat 9, las bandas son 4 y 5 respectivamente.

$$\text{Ecuación 1 } NDVI = (NIR - VIS)/(NIR + VIS)$$

Donde, NIR indica Banda Infrarrojo cercano y VIS es la Banda rojo visible

Por otro lado, se utilizó el NDWI para evaluar la humedad que posee la vegetación, conocer su condición en cuanto a estrés hídrico y saturación de la cobertura vegetal. En la práctica, el NDWI se calcula como la diferencia entre el infrarrojo cercano y el infrarrojo de onda corta dividido por la suma de estas (Alvarado et al., 2019). Sus valores también varían entre el -1 y el 1. A continuación la interpretación de sus datos.

| Rango | Descripción |
|------------|---------------------------|
| < 0,01 | Sequía muy fuerte |
| 0,01 – 0,1 | Sequía fuerte |
| 0,1 – 0,2 | Extremadamente seco |
| 0,2 – 0,4 | Sequía débil |
| >0,40 | Contenido de humedad bajo |

Tabla 5. Valores de NDWI

Fuente: Campaña-Olaya (2021)

Para Landsat 5 se utilizaron las bandas 4 para el infrarrojo cercano y 5 para el infrarrojo de onda corta, mientras que para Landsat 9 se utilizaron las bandas 5 y 6 respectivamente.

$$\text{Ecuación 2 } NDWI = (NIR - SWIR)/(NIR + SWIR)$$

Donde, NIR indica Banda Infrarrojo cercano y SWIR Banda Infrarrojo de onda corta

Tras calcular cada índice, se generaron histogramas y datos estadísticos para visualizar mejor la distribución de los valores de cada píxel. Para esto se utilizó el code editor de GEE (código: **var ndwiHist = ui.Chart.image.histogram** y **var stats = indice_w.reduceRegion({ reducer: ee.Reducer.mean() .combine(ee.Reducer.min(), ', ' .combine(ee.Reducer.max(), respectivamente).**

Para finalizar, se le ordenó a la plataforma descargar las 12 imágenes trabajadas junto con los histogramas para la realización de cartografías en el software Qgis. Para un mejor orden, se le

asignó un código a cada ráster descargado, compuesto por el año de estudio, seguido por el número correspondiente a cada mes de estudio y finalizando con un número 1 en el caso de tratarse de un NDVI o un 2 en el caso de un NDWI. Para los histogramas, se utilizó el mismo código, pero sucedido por una 'H'. Por ejemplo, una imagen en que se visualiza el histograma NDVI para el periodo julio-agosto del año 1986, esta se consigna con el código 198607081H.

2.2 Etapa 2: Cuantificar la extensión areal y comparar los cambios en el estado de los cultivos del valle del Limarí entre años pre y post mega sequía.

Para la presente etapa, se trabajó en GEE sólo con ambos extremos de la serie de tiempo, es decir, las tierras de cultivo de los años 1986 y 2023 junto con los distintos índices aplicados. Debido al interés de conocer los cambios en el estado de las tierras de cultivo entre años considerados como pre y post mega sequía, el año 2007 no fue utilizado en esta etapa. Es la falta de una estación de primavera-verano lo que impide una comparación prolija entre periodos.

En esta ocasión se procedió a calcular el Índice de Sequía Normalizado. Este se calcula como la resta de los valores de NDVI y NDWI dividido por la suma de estos. Los valores altos indican un estado de sequía en los cultivos, mientras que los valores bajos representan valores sin sequía (Du, et al., 2018). Al incorporar dos índices en su fórmula, este índice entrega datos significativos en áreas donde la escasez hídrica pone en riesgo el rendimiento de los cultivos, contribuyendo a los sistemas de alerta temprana y toma de decisiones (Herawati, 2024).

En este punto es importante destacar que, mediante una revisión de la fórmula, se pudo concluir que, al tratarse de una división, en caso de que el denominador se aproxime a 0, el resultado del índice podría presentar valores que amplifiquen el rango de forma desmedida. Esta situación puede ocurrir cuando, ambos índices (NDVI y NDWI) tengan el mismo valor con signos opuestos o cuando ambos índices sean muy pequeños, en valores cercanos a 0.

Su implementación en el presente estudio significó la exclusión de una cantidad mínima de píxeles que no afectó significativamente los resultados. A continuación, se presentan la categorización y fórmula utilizada.

| Rango | Descripción de sequía |
|------------|-----------------------|
| < -2 | Muy baja |
| -2 – 0,7 | Baja |
| 0,7 – 1,25 | Mediana |
| 1,25 - 3 | Alta |
| > 3 | Muy Alta |

Tabla 6. Valores de NDDI
Fuente: Herawati, et al., (2024)

$$\text{Ecuación 3 NDDI} = \frac{NDVI - NDWI}{NDVI + NDWI}$$

Teniendo en consideración que se utilizaron los años 1986 y 2023, y los peak de causal estudiados son dos, la ecuación fue repetida 4 veces. Obteniendo 4 imágenes ráster con los resultados de NDDI. Estas, luego fueron descargadas para realizar cartografías en el software Qgis donde también se realizó la reclasificación del ráster en 5 categorías (de acuerdo con la Tabla 6), para luego vectorizar los mismos y así habilitar el cálculo de área de cada categoría. Logrando finalmente cuantificar y comparar los cambios en el estado de los cultivos.

Para su mejor comprensión, la Figura 6 muestra lo anteriormente explicado.

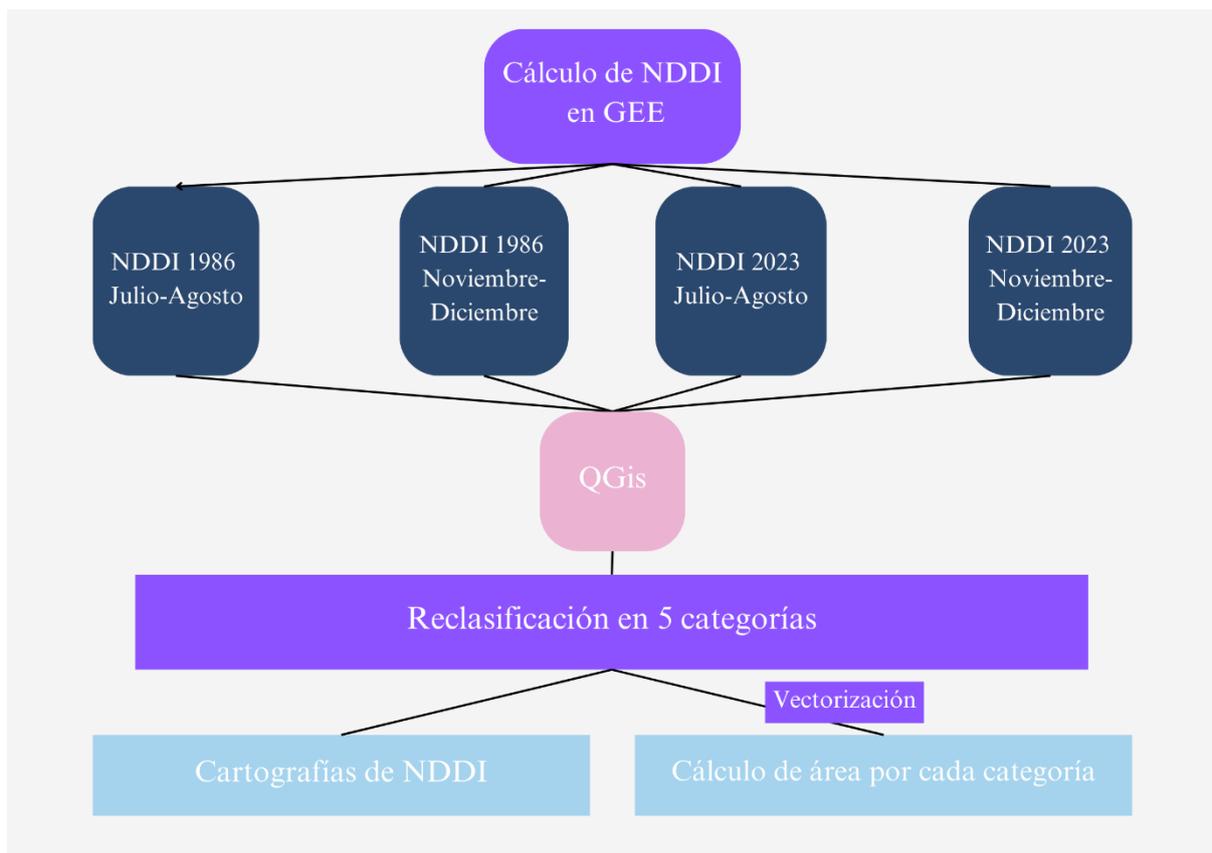


Figura 6. Esquema para el trabajo con NDDI. En morado los métodos, en rosado las herramientas y en celeste los resultados.

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 3: Resultados

En el siguiente apartado, se muestran resultados obtenidos para abordar los objetivos 1 y 2 de la presente memoria. De acuerdo con las técnicas de teledetección implementadas, fue posible evaluar cambios en el vigor y humedad de los cultivos presentes en las tierras agrícolas para los años 1986, 2007 y 2023 tanto para los meses de invierno como primavera-verano. Así, se proporcionan los resultados obtenidos y además sus histogramas asociados. Seguidamente, se exponen y desarrollan las imágenes correspondientes a la categorización del estado de las tierras de cultivo del valle en función de su cambio entre años pre y post mega sequía. Lo anterior, acompañado de una tabla comparativa que expone el área de cada categoría.

3.1 Cambios de vigor y estrés hídrico de los cultivos.

3.1.1 1986

Para el periodo pre mega sequía, representado por el año 1986 (Figura 7), se observa que durante el invierno (julio-agosto) los valores de NDVI se distribuyen entre los valores 0,6 y -0,2, con promedio de valor de píxel 0,16. Lo que responde, de acuerdo con la metodología utilizada, a “Vegetación ligera, poco vigor”. Los valores de NDVI durante primavera-verano varían entre los valores máximos de 0,5 “Vegetación densa, muy vigorosa” y mínimo de -0,3 “Sin vegetación”. Para esta estación, la cual responde a un peak de caudal dado por el derretimiento de la nieve aguas arriba de la cuenca, presenta el mismo promedio para la estación de invierno, es decir, 0,16. En efecto, los histogramas obtenidos (Figura 8) son consistentes con este patrón, sin embargo es importante destacar que, si bien el promedio entre ambas estaciones no cambia, es para los meses de primavera-verano donde se puede notar una disminución en la frecuencia de valores de NDVI en datos mayores a 0,1. Es decir, existe una disminución de la vegetación ligera con poco vigor.

En relación con el NDWI (Figura 9), para el año 1986, de acuerdo con las estadísticas obtenidas, para los meses de julio-agosto el estrés hídrico de las tierras de cultivo varía entre todas las categorías del índice, pues los valores mínimos se encuentran en -0,7 y los máximos en 0,51. El promedio de los datos, se encuentra en un valor de píxel de 0,03, es decir, un estrés hídrico de categoría “sequía fuerte”. Para los meses de primavera-verano, el promedio se encuentra en la misma categoría, teniendo un valor de 0,02. En cuanto al rango de distribución máxima y mínima de los datos, estos se encuentran entre valores de 0,43 y -0,5 respectivamente. Este comportamiento de los valores de estrés hídrico en las tierras de cultivo puede observarse en los histogramas obtenidos (Figura 10).

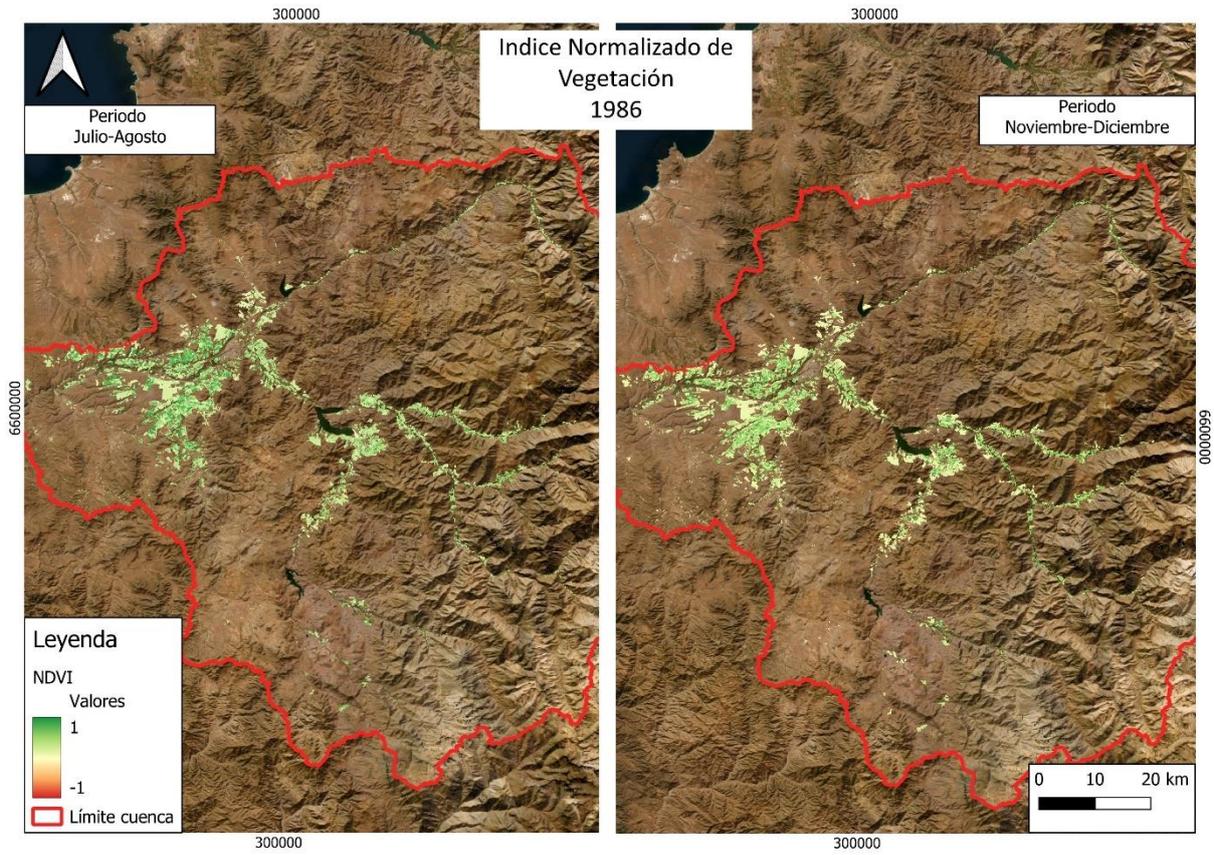


Figura 7. Índice Normalizado de Vegetación en el Valle del Limarí para el año 1986.
Fuente: Elaboración propia

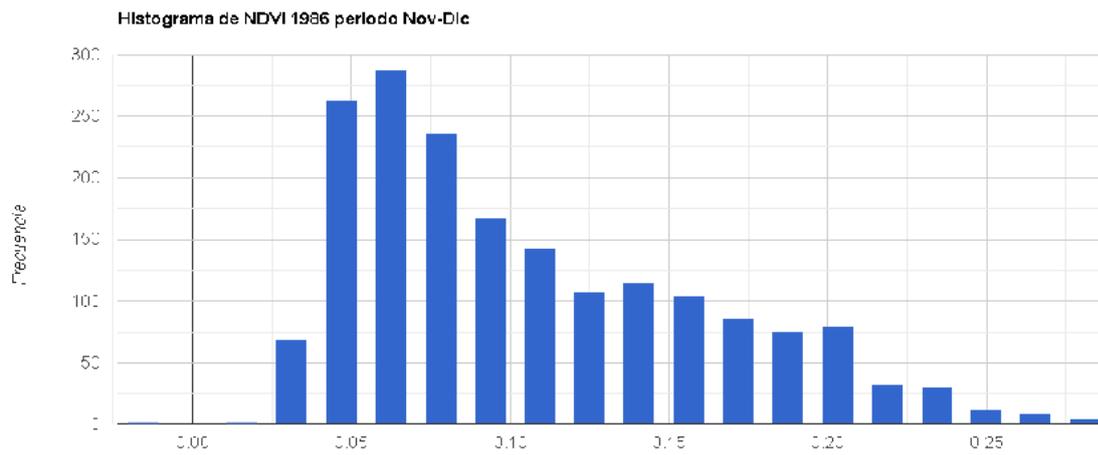
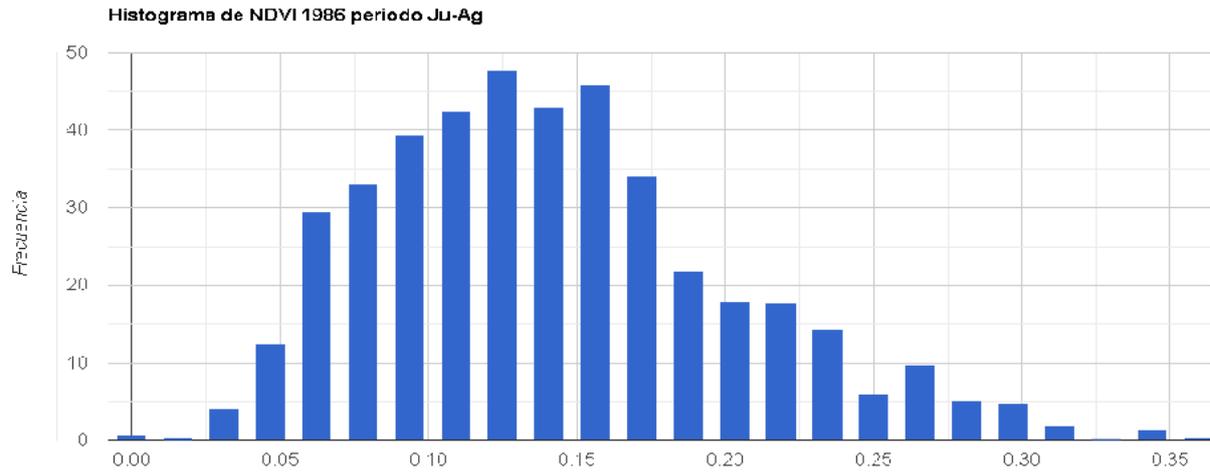


Figura 8. Histograma de NDVI en el Valle del Limarí para el año 1986.
Fuente: Elaboración propia

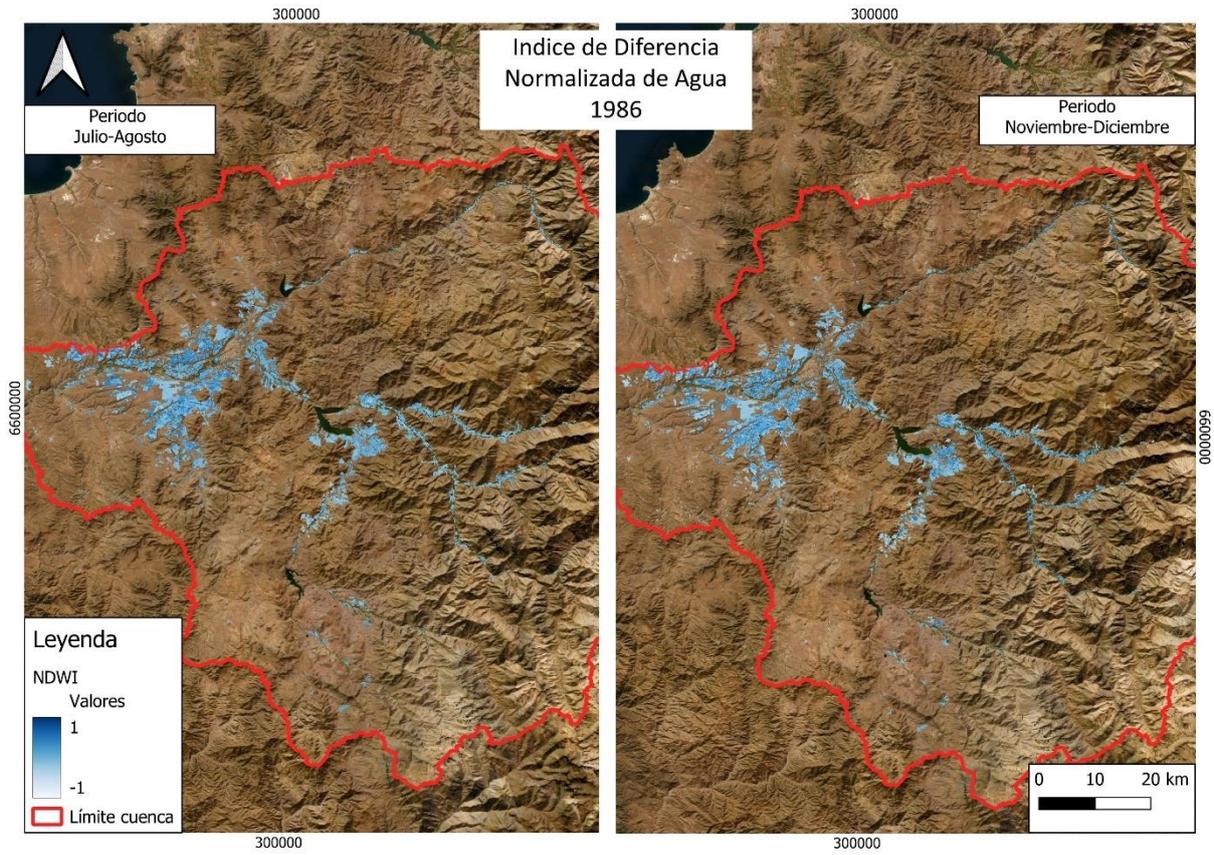


Figura 9. Índice de Diferencia Normalizada de Agua en el Valle del Limarí para el año 1986.
 Fuente: Elaboración propia

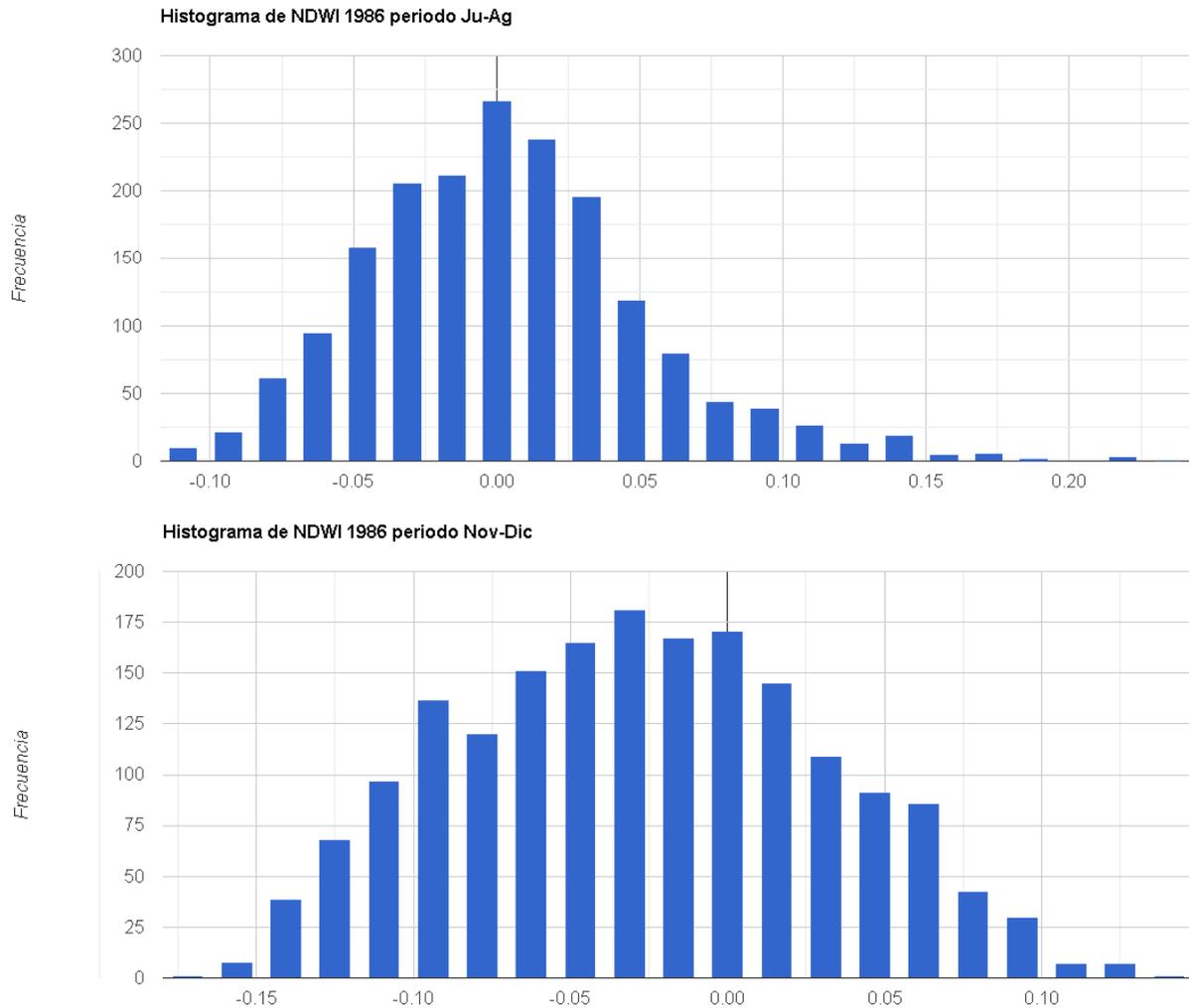


Figura 10. Histograma de NDWI en el Valle del Limarí para el año 1986.
Fuente: Elaboración propia

3.1.2 2007

Los resultados obtenidos para el año 2007 (Figura 11) muestran que al igual que en 1986, el comportamiento de los valores es bastante similar. En este sentido, para los meses que representan un peak de caudal dado por la pluviometría, la vigorosidad de la vegetación se encuentra en un valor promedio de 0,1, es decir, en la categoría “Vegetación ligera, poco vigor”. El valor más alto alcanza una categoría de “Vegetación densa, muy vigorosa” con un valor de 0,58. Mientras que el valor más bajo es de -0,1, es decir, una categoría que corresponde a “Sin vegetación”.

Para este año de estudio, es importante señalar que esta comparación interanual no es totalmente ecuánime, ya que la estación cálida para 2007 se basa en imágenes satelitales del mes de septiembre. Recordando lo anterior, para este mes los valores sólo cambian dentro del orden de las centésimas, siendo el promedio 0,1, y los valores máximos y mínimos 0,51 y -0,2 manteniendo las mismas categorías. Los histogramas (Figura 12) son consistentes con lo anteriormente interpretado, no observando mayores cambios entre ellos.

Para los valores de estrés hídrico de los cultivos presentes en las tierras agrícolas (Figura 13), entre las estaciones de estudio, el promedio se presenta con el mismo valor (-0,02). Correspondiente a la categoría de “sequía muy fuerte”. Es para los meses de julio-agosto que la distribución de los datos muestra gran amplitud, siendo el valor de estrés hídrico más bajo -0,6 y el más alto 0,5. Estos datos se modifican para el mes de septiembre a -0,3 y 0,35 respectivamente. Denotando que, para los meses con más pluviometría, los cultivos alcanzan mejores condiciones de estrés hídrico. Esta, puede evidenciarse en los histogramas (Figura 14).

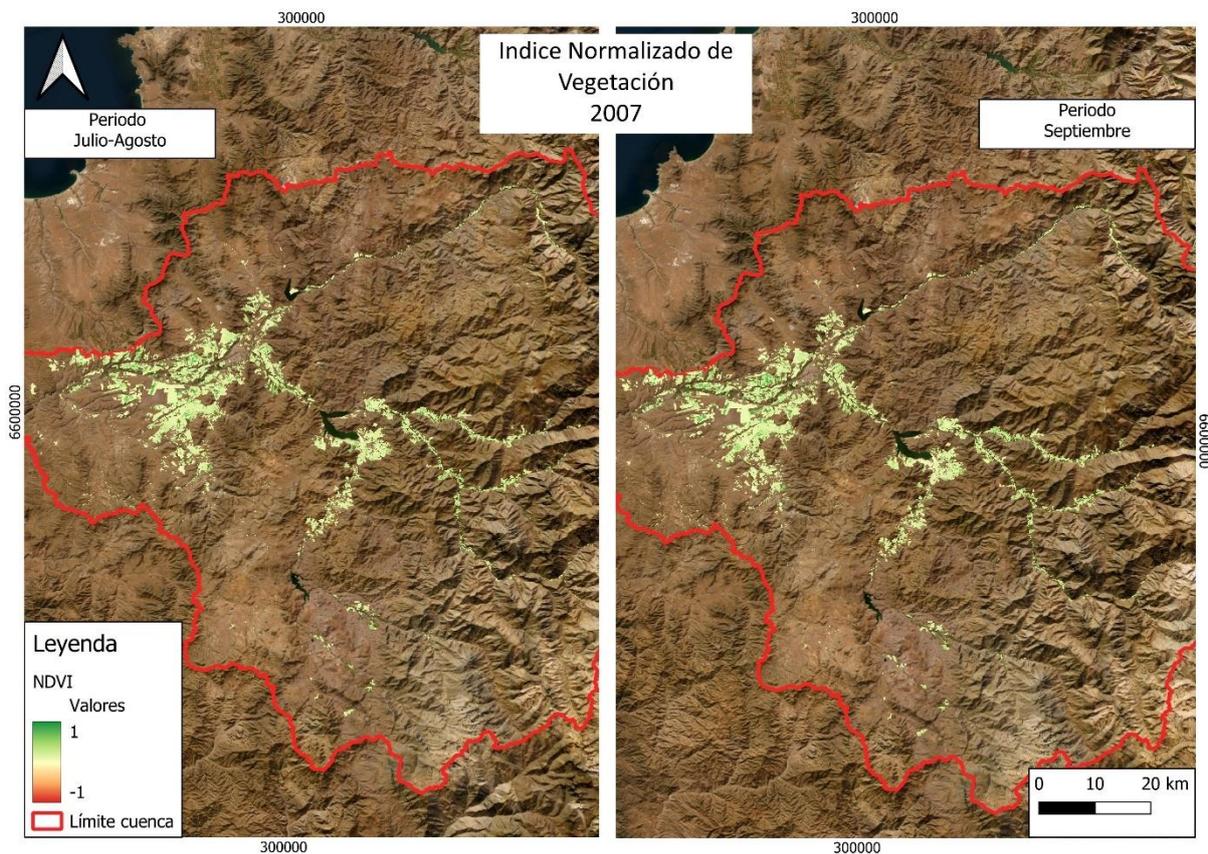


Figura 11. Índice Normalizado de Vegetación en el Valle del Limarí para el año 2007.

Fuente: Elaboración propia

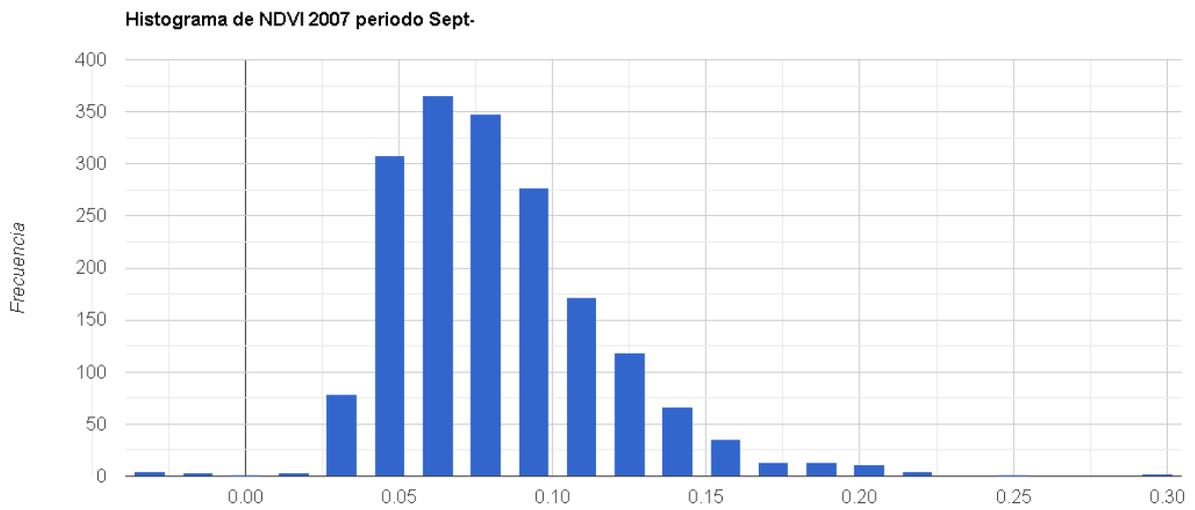
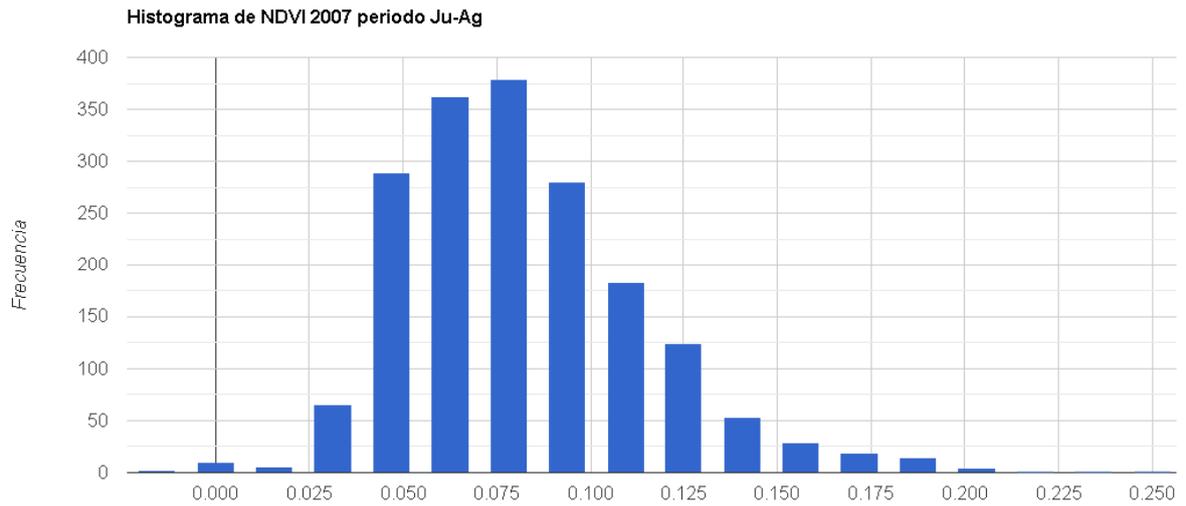


Figura 12. Histograma de NDVI en el Valle del Limarí para el año 2007.
Fuente: Elaboración propia

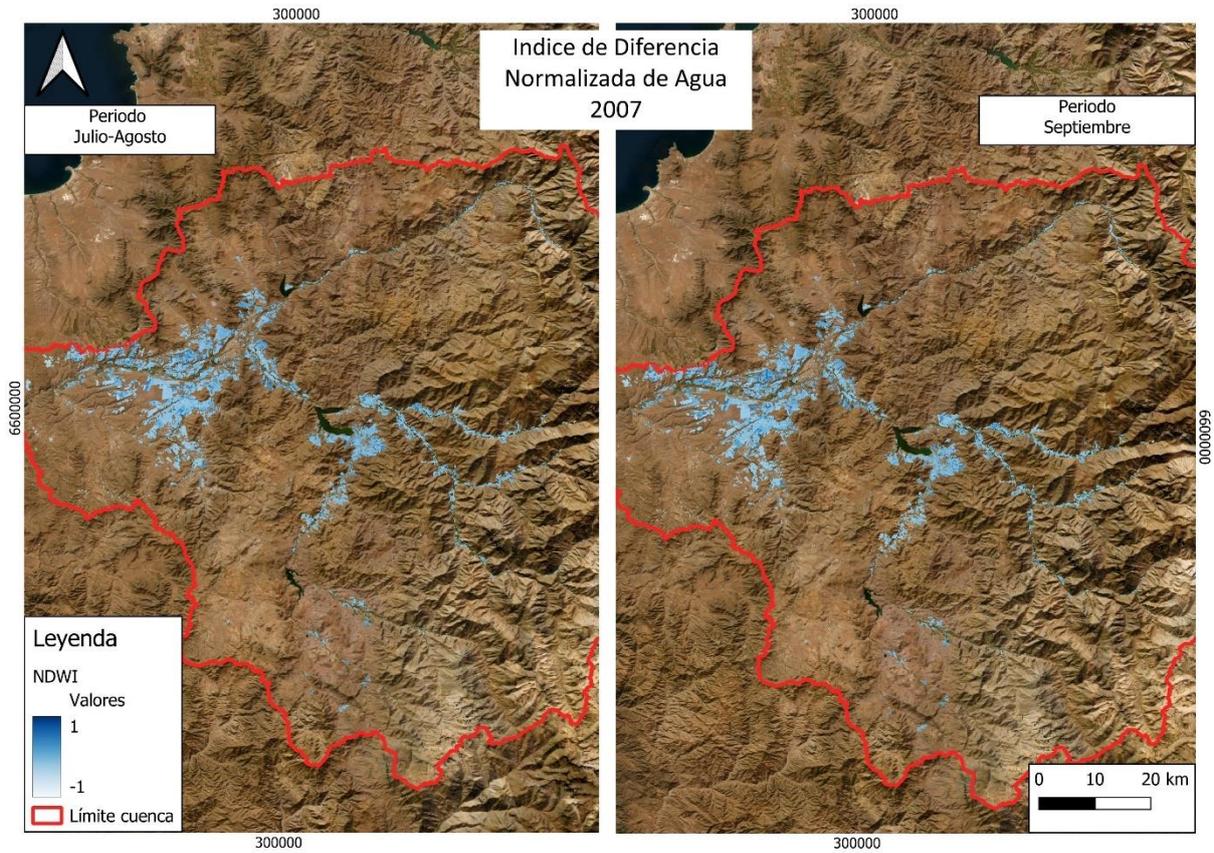


Figura 13. Índice de Diferencia Normalizada de Agua en el Valle del Limarí para el año 2007.

Fuente: Elaboración propia

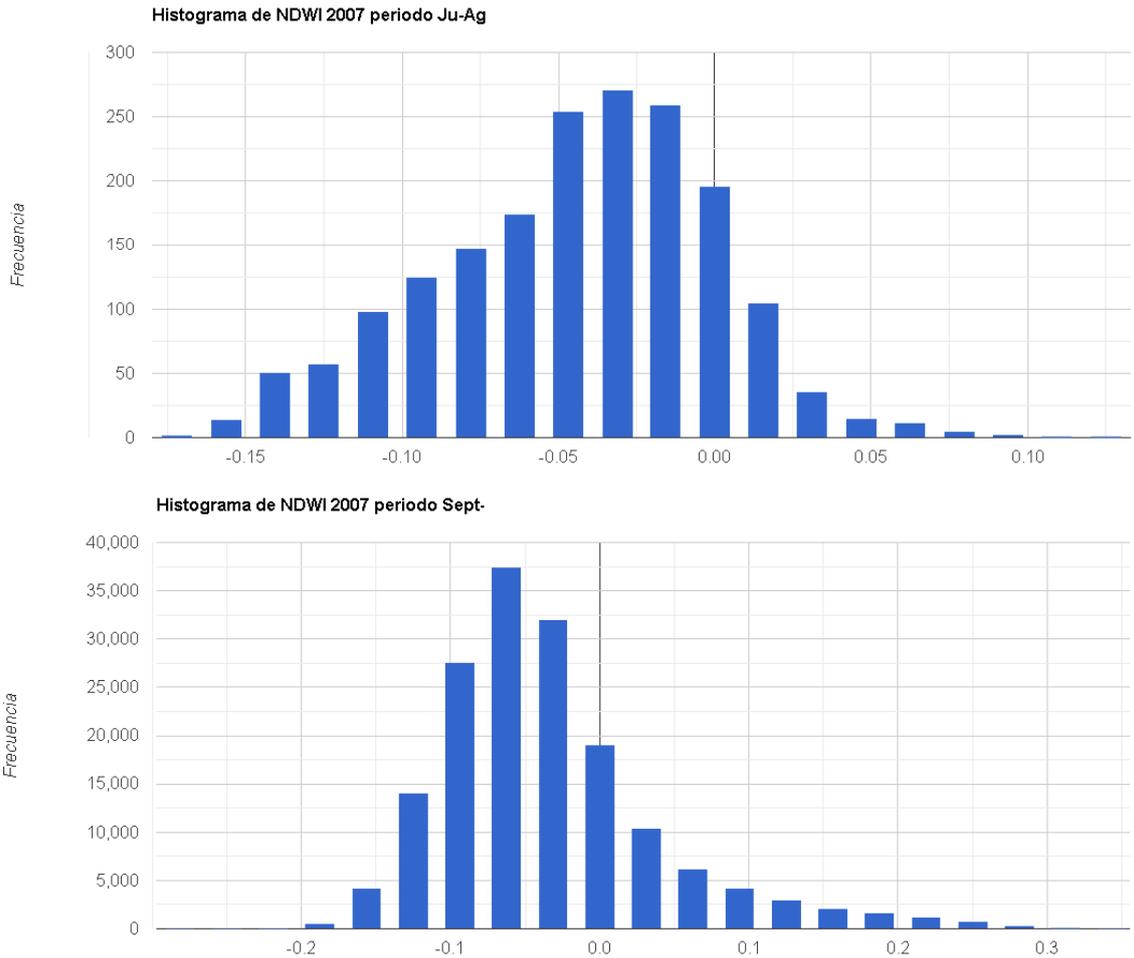


Figura 14. Histograma de NDWI en el Valle del Limarí para el año 2007.

Fuente: Elaboración propia

3.1.3 2023

Durante el invierno, la vigorosidad de la vegetación (Figura 15) fluctúa entre las categorías “Vegetación densa, muy vigorosa” y “Sin vegetación” encontrando el valor máximo de 0,56 y mínimo de -0,09. El promedio para esta estación se encuentra en 0,16, es decir, “Vegetación ligera, poco vigorosa”. Para los meses donde el peak de caudal es marcado por el derretimiento de la nieve, los valores presentan cambios leves en comparación con invierno, donde el rango más bajo es de -0,15 y el más alto 0,6, mientras que el promedio es de 0,26, elevando su categoría de vigorosidad a “Vegetación media, vigor medio”.

Si bien el promedio no cambia sustancialmente desde una estación a otra, de acuerdo con los histogramas de NDVI (Figura 16), para los meses de noviembre-diciembre se puede notar una

mayor concentración de datos hacia valores negativos en comparación con los meses de julio-agosto. Esto, puede deberse a que el aporte pluvial tuvo una mayor incidencia en la cuenca que el derretimiento de la capa nival desarrollada aguas arriba.

Para los valores de estrés hídrico (Figura 17), es para invierno donde, de acuerdo con las estadísticas obtenidas, se obtiene el valor más pequeño de las dos estaciones en estudio, siendo de -0,55. Lo que cuantitativamente significa que los cultivos se encuentran en un importante estrés hídrico de categoría “sequía muy fuerte”. Para los meses de noviembre-diciembre, este mismo valor, si bien se encuentra en la misma categoría, aumenta a -0,2. En cuanto a los valores máximos, estos son de 0,38 para invierno y 0,39 para primavera verano, correspondientes a categorías de estrés hídrico “contenido de humedad bajo”. En cuanto a los promedios, para el peak de caudal en invierno, es de 0,008 y para el peak de caudal en primavera-verano de 0,036, ambos dentro de la categoría “sequía muy fuerte”

En los histogramas del presente índice se puede notar que existe una concentración de la distribución de los datos hacia valores del índice bajo 0, lo que se condice con el bajo promedio que presentan ambas estaciones (Figura 18).

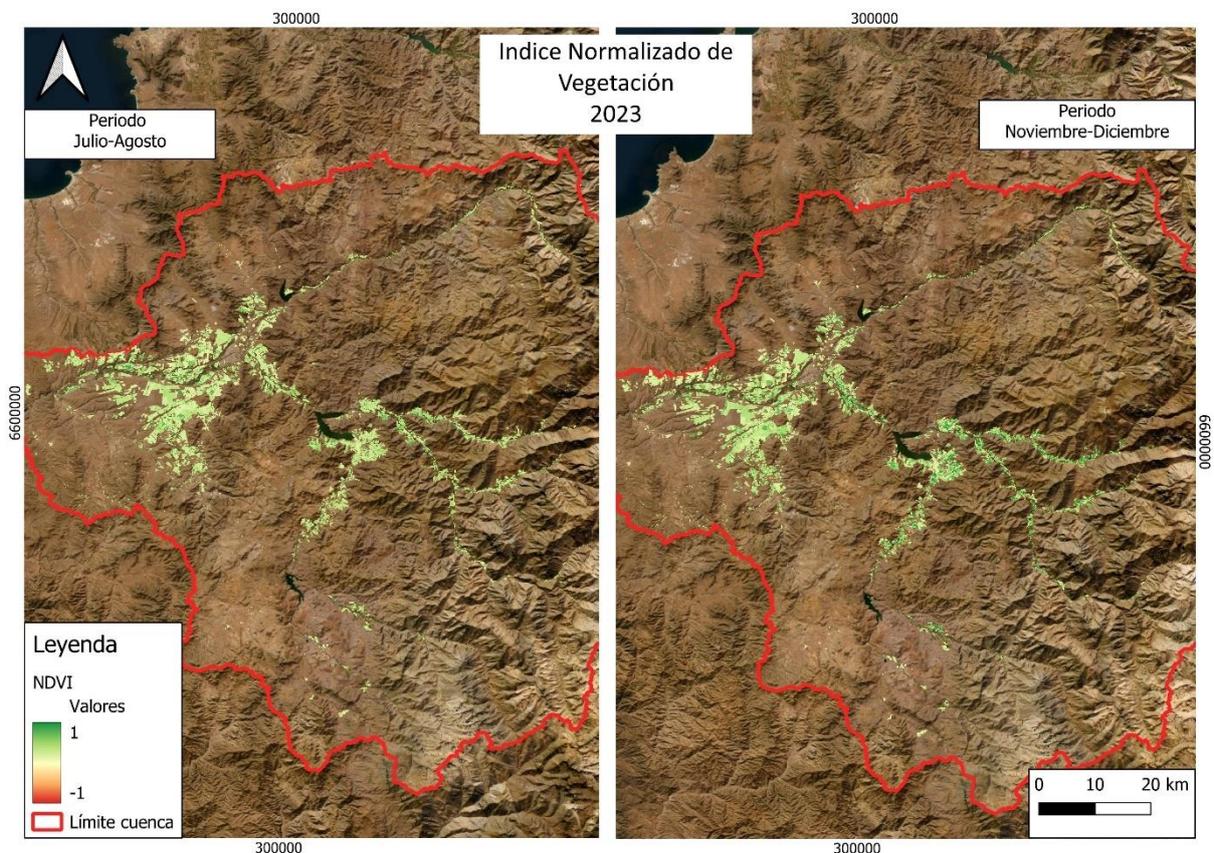


Figura 15. Índice Normalizado de Vegetación en el Valle del Limarí para el año 2023.
Fuente: Elaboración propia

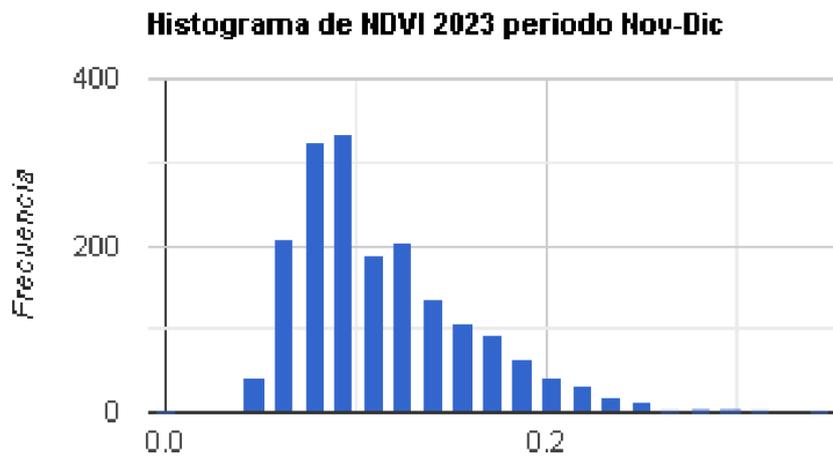
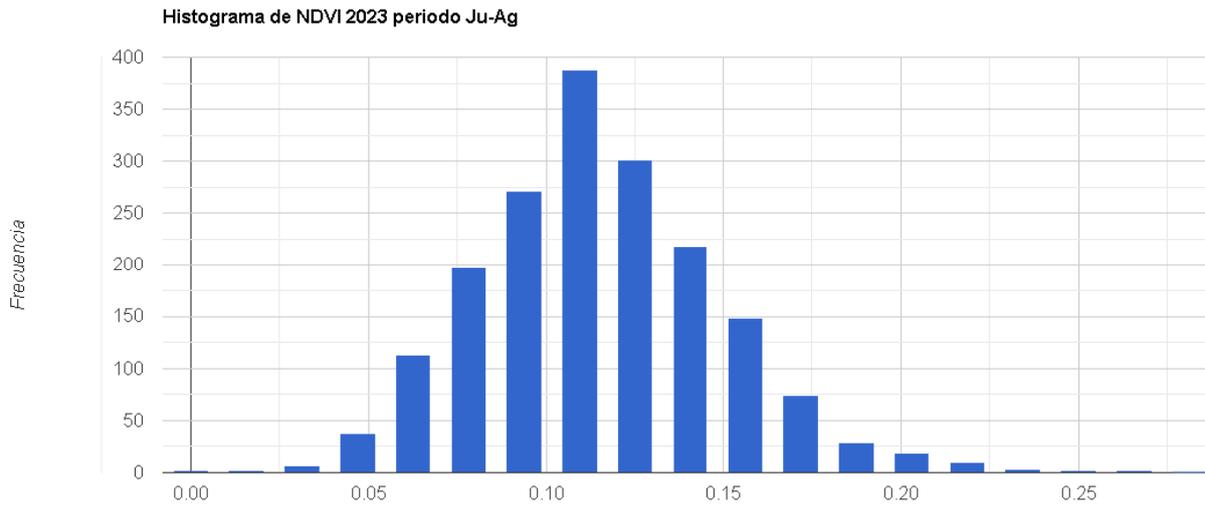


Figura 16. Histograma de NDVI en el Valle del Limarí para el año 2023.
Fuente: Elaboración propia

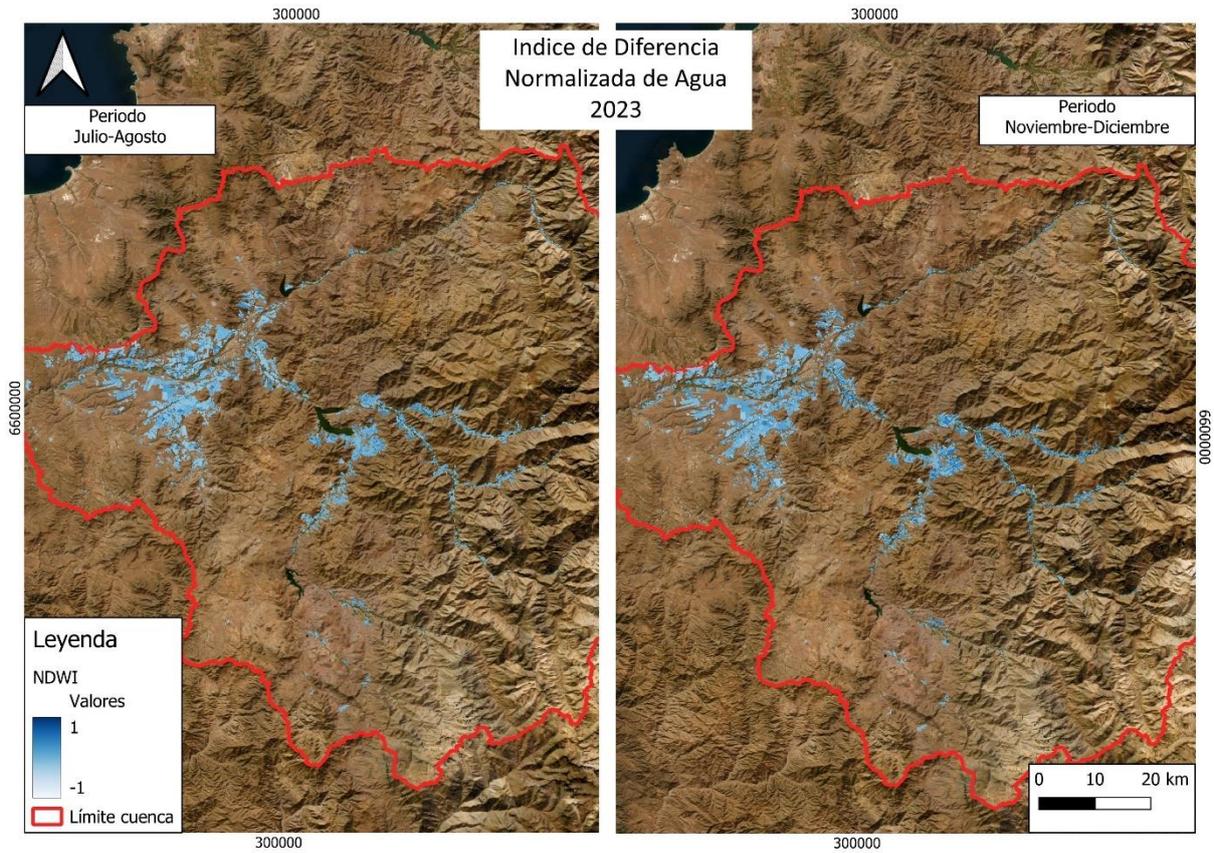


Figura 17. Índice de Diferencia Normalizada de Agua en el Valle del Limarí para el año 2023.

Fuente: Elaboración propia

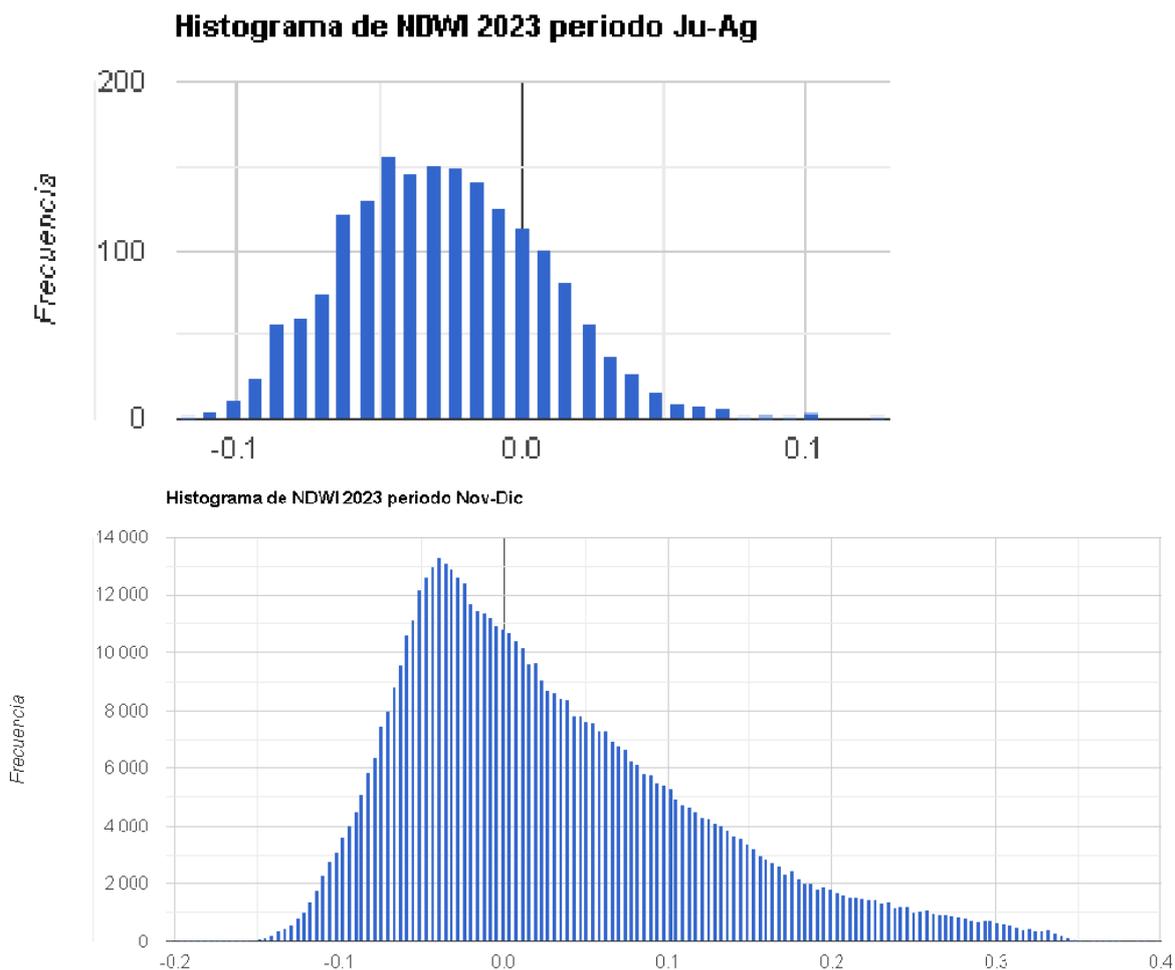


Figura 18. Histograma de NDWI en el Valle del Limarí para el año 2023.

Fuente: Elaboración propia

En resumen, la evolución de la ventana temporal puede visualizarse de mejor forma en los gráficos de las Figuras 19 y 20. Como es posible observar, el análisis comparativo de valores de NDVI no presentan patrones claros de declive, manteniendo los valores máximos en cada caso cercanos a 0,5. Son incluso los valores extremos mínimos los que se acercan a 0 a medida que pasan los años.

Por su parte, es la evolución del estrés hídrico de las plantas un indicador determinante al momento de conocer el estado de las tierras de cultivo. De acuerdo con los datos estadísticos, se puede notar que los valores más altos de NDWI disminuyen su valor desde septiembre de 2007 a la actualidad. Por tanto, para los periodos más actuales, sería menos probable ver cultivos sin un estrés hídrico evidente.

En general, para este indicador, a lo largo del tiempo se puede ver que la amplitud de los datos disminuye, es decir, hoy en día los valores de estrés hídrico están mucho más cercanos a 0 que durante el periodo de pre mega sequía.

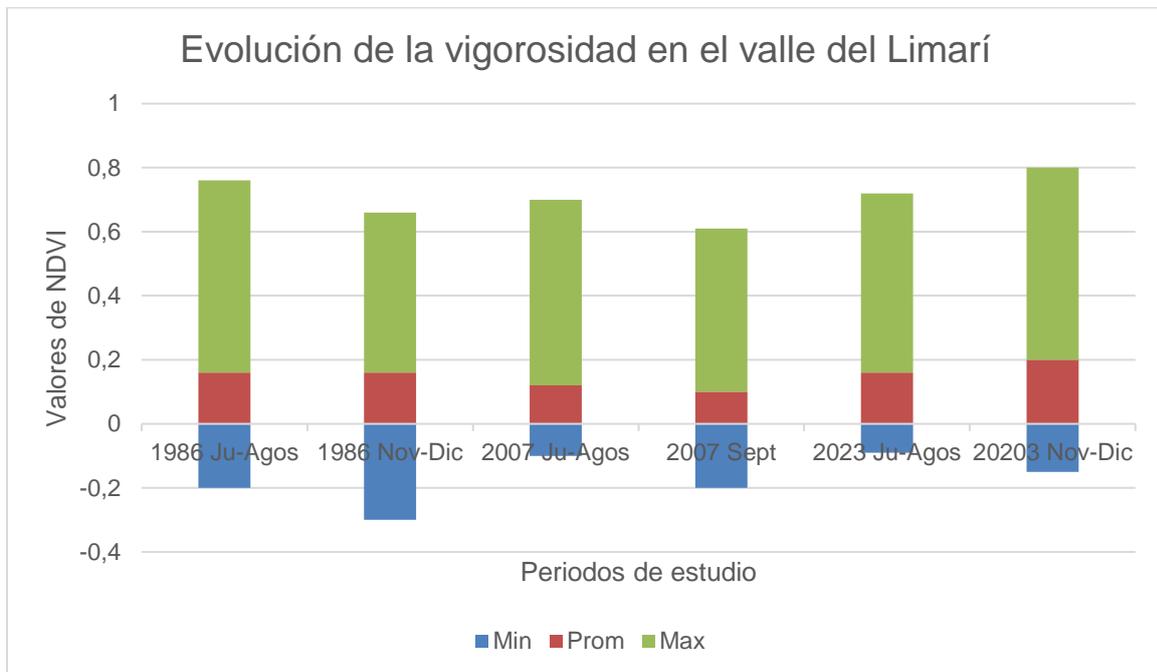


Figura 19. Evolución de la vigorosidad en el valle del Limarí
Fuente: Elaboración propia

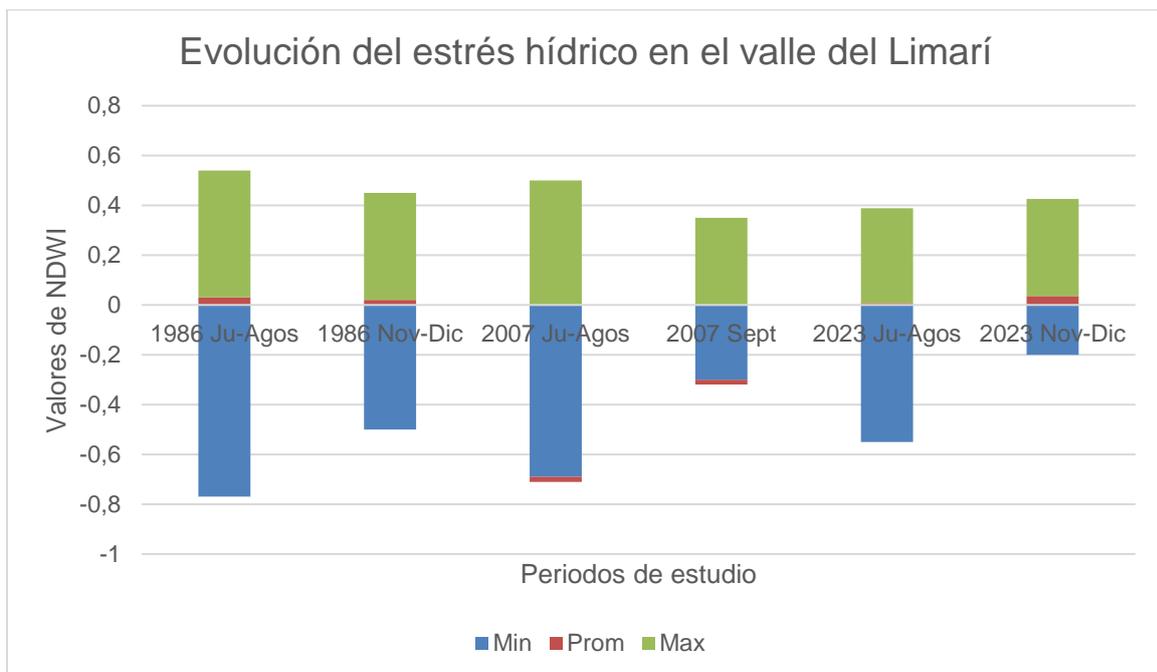


Figura 20. Evolución del estrés hídrico en el valle del Limarí
Fuente: Elaboración propia

3.2 Comparación del estado de los cultivos entre años pre y post mega sequía.

En base a los resultados del objetivo específico 1, fue posible implementar el índice NDDI para el área de estudio. Permitiendo conocer el cambio en el estado de los cultivos del valle del Limarí y su cuantificación en kilómetros cuadrados.

La visualización y disposición espacial puede verse en las siguientes cartografías.

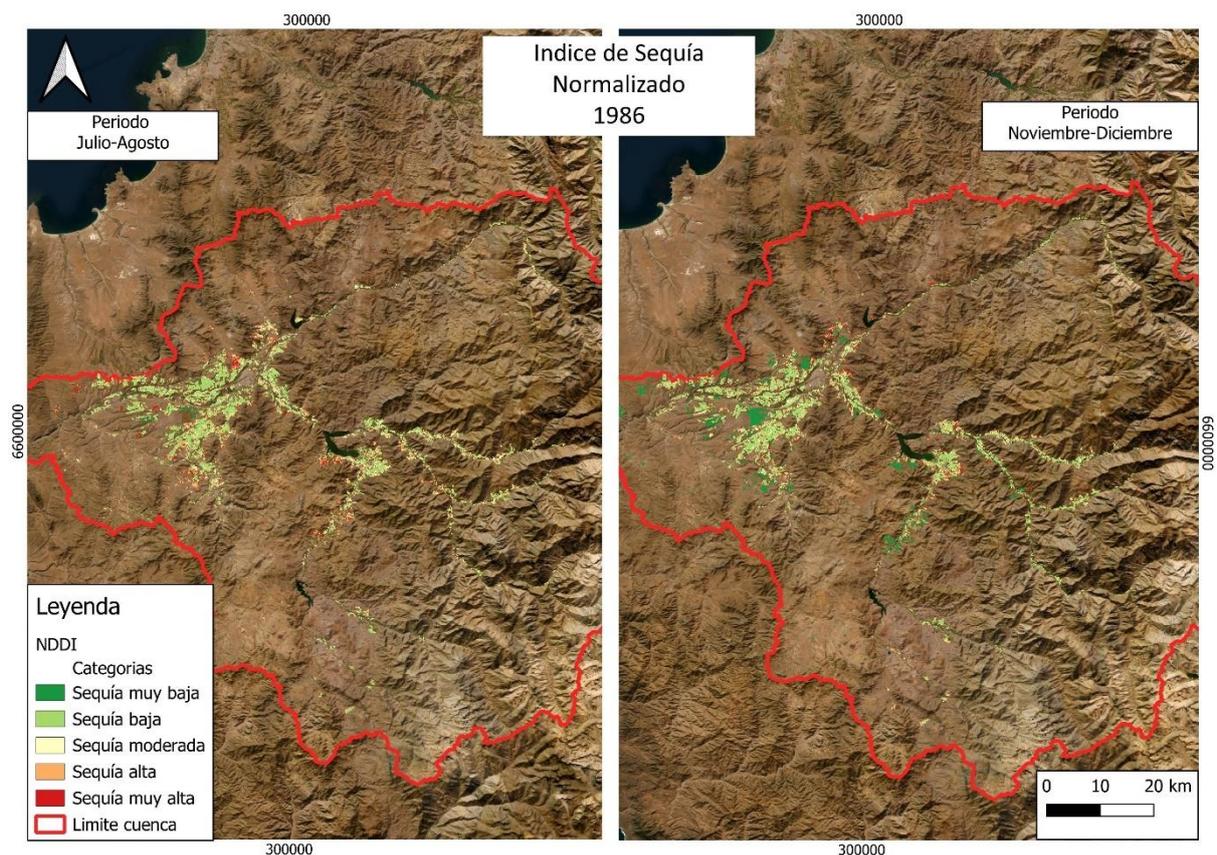


Figura 21. Índice de Sequía Normalizado para el Valle del Limarí durante el año 1986

Fuente: Elaboración propia

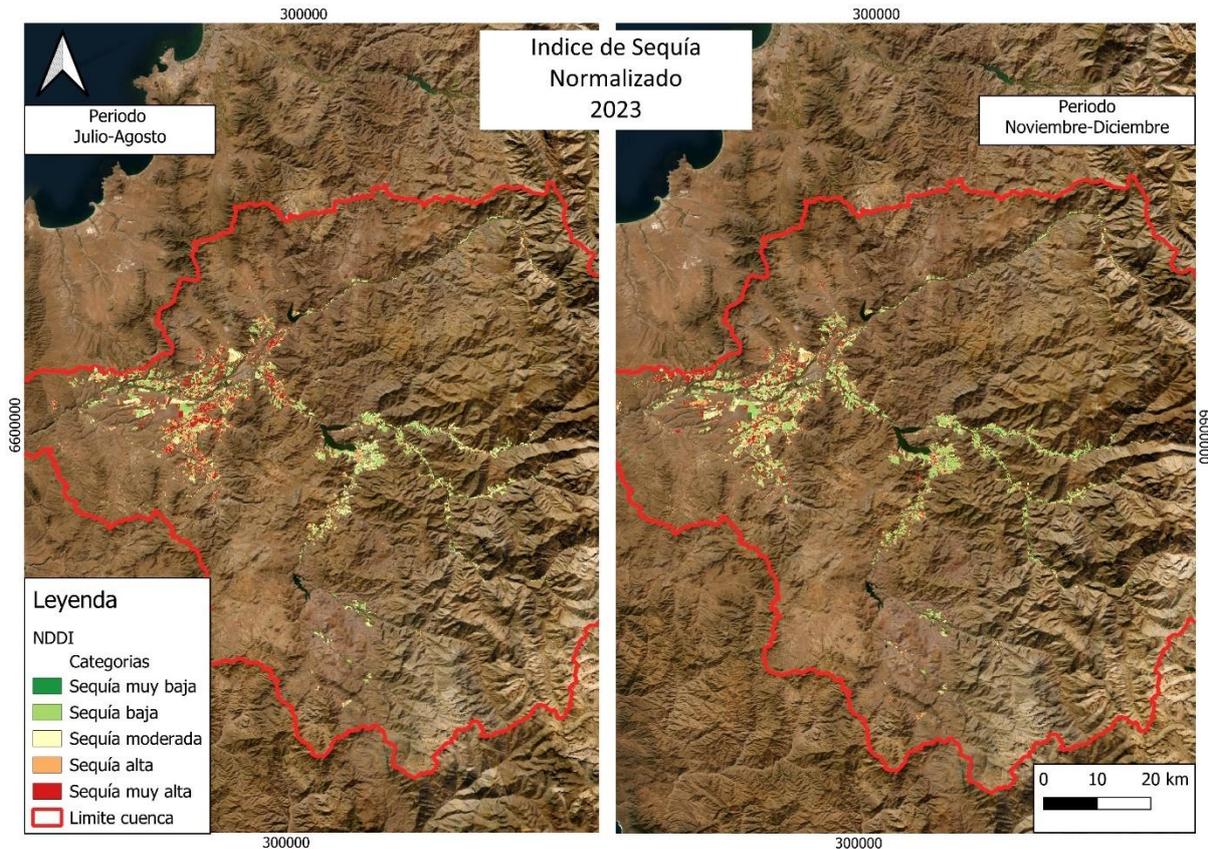


Figura 22. Índice de Sequía Normalizado para el Valle del Limarí durante el año 2023
Fuente: Elaboración propia.

En primera instancia y a través de una rápida revisión visual, es posible determinar que, en el año 1986 (Figura 21), durante primavera-verano, los cultivos presentes en las tierras agrícolas se encuentran en mejores condiciones que durante los meses de invierno, esto, por la cantidad de área que puede denotarse en color verde en contraste con el color rojo. Ambos periodos, durante el año 2023 (Figura 22) muestran signos de degradación, pues es posible ver que la categoría más alta, referida a “sequía muy alta”, aumenta su área.

Ahora, analizando los cambios con respaldo cuantitativo (Tabla 7), efectivamente el peak de caudal pluviométrico de invierno durante el año 1986 demuestra tener una menor extensión de cultivos en la categoría “sequía muy baja” en comparación con el peak de caudal de los meses de primavera-verano, comprometiendo 27,95 y 92,9 kilómetros cuadrados respectivamente. Esta misma categoría presenta una disminución en su área para el año 2023, lo cual, en el contexto actual de mega sequía, presenta para los meses de invierno 11,66 km² y 12,16 km². Estos resultados dejan en evidencia que, en la actualidad, existe una menor cantidad de superficie asociada a cultivos en un buen estado tanto en vigor, como en estrés hídrico.

Para la categoría “sequía baja”, los meses julio-agosto del año 1986 se presenta con una mayor incidencia (207,1 km²). Sin embargo, durante los mismos meses en el año 2023, se registra la menor extensión en kilómetros cuadrados (135.23 km²), lo cual rectifica que el estado de los cultivos era favorable durante el periodo pre mega sequía gracias a los aportes pluviales de la

cuenca. Durante la estación primavera-verano no es posible ver mayores cambios, con 189 km² para 1986 y 188.7 km² para 2023.

Continuando con la categoría “sequía moderada”, es el periodo post mega sequía donde se concentra la mayor cantidad de kilómetros cuadrados; 112,54 km² para invierno y 94,6 km² para primavera-verano. Mientras que para el año 1986, su área era menor con 86,5 km² y 64,22 km² respectivamente. Es importante destacar que, comparando las estaciones dentro de los mismos años, son los meses de julio-agosto, tanto para 1986 como para 2023, que cuentan con una mayor extensión, demostrando una diferenciación en la incidencia del peak de caudal invernal con el peak de caudal primera-verano.

Ahora, examinando las categorías que denotan un estado más degradado de los cultivos, el periodo pre mega sequía cuenta con una menor cantidad de kilómetros cuadrados en condiciones de “sequía alta”, con 77,5 km² para invierno y 53,7 km² para primavera-verano. Mientras que la evolución hacia el 2023 demuestra que tanto la sequía como la escasez hídrica que afecta al área de estudio ha incidido en el estado de los cultivos. Presentado para julio-agosto 109.66 km² y 90 km² para noviembre-diciembre. Lo que posiciona al periodo con peak de caudal pluvial como el más afectado.

Finalmente, en cuanto a la categoría que expresa un mayor grado de degradación en el estado de los cultivos correspondiente a “sequía muy alta”, durante el año 2023 es donde se encuentra la mayor extensión con 82 km² y 65.48 km² para invierno y primavera-verano respectivamente. Así mismo, es posible notar que el peak de caudal dado por el aporte pluvial cuenta con una mayor extensión en esta categoría, demostrando una importante falta del recurso hídrico para este periodo, que, como se ha visto a lo largo de la presente investigación, se encuentra condicionado por el evento de mega sequía.

| Periodo/Categoría | Sequía muy baja | Sequía baja | Sequía moderada | Sequía alta | Sequía muy alta |
|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1986 Jul-Agos | 27,95 km ² | 207,1 km ² | 86,5 km ² | 77,5 km ² | 51,9 km ² |
| 1986 Nov-Dic | 92,9 km ² | 189 km ² | 64,22 km ² | 53,7 km ² | 51,2 km ² |
| 2023 Jul-Agos | 11,66 km ² | 135,23 km ² | 112,54 km ² | 109,66 km ² | 82 km ² |
| 2023 Nov-Dic | 12,16 km ² | 188,7 km ² | 94,6 km ² | 90 km ² | 65,48 km ² |

Tabla 7. Cuantificación del área del estado de los cultivos.

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 4: Discusión

Este estudio examinó la trayectoria temporal del estado de los cultivos del valle del Limarí a través de imágenes satelitales utilizando herramientas de teledetección, junto con la aplicación de índices como el NDVI, NDWI y NDDI entre años seleccionados dentro de periodos pre y post mega sequía (1986-2007-2023). A través de este análisis se buscó reconstruir los cambios en vigor y estrés hídrico de los cultivos, para luego comparar el estado de los mismos dentro de un marco histórico. Bajo un contexto de cambio hidroclimático marcado por la mega sequía, pero además capturando un escenario de transición en el modelo de producción y sustento económico: desde una tradicional a una dedicada a la exportación.

A lo largo del tiempo el valle del Limarí se ha posicionado como un pilar fundamental en cuanto a su producción agrícola. Si bien la agricultura en cuanto a vigorosidad y estrés hídrico no presenta cambios significativos durante los periodos analizados, los resultados obtenidos en base a la unión de estos dos indicadores evidencian un estado actual de deterioro. Así, en esta memoria se expone que la situación de este sector productivo se encuentra en declive debido a la combinación de factores hidroclimáticos, pero además socio-ambientales. El déficit de precipitaciones y el aumento de las temperaturas que afecta a Chile semi-árido (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, 2015; Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, 2023) ha resultado en condiciones no aptas para un crecimiento adecuado de los cultivos en el valle del Limarí. Esta investigación, con análisis basados en índices NDVI, NDWI y NDDI confirman estas tendencias, las cuales podrían exacerbarse si no se implementan cambios en las practicas actuales.

Considerando que, en 1986, el área de los cultivos que se encontraba en estado de “sequía muy alta” para los meses de invierno y primavera verano, son de 51,9 km² y 51,2 km² respectivamente. Para 2023, estas cifras aumentan a 82 km² y 65.48 km². Denotando un aumento de área en la categoría. Por otro lado, la extensión del estado de los cultivos en 1986 que se encontraba en estado de “sequía débil” eran mayores para ambas estaciones de estudio en comparación con las existentes en 2023. Denotando, esta vez, una disminución en el área de la categoría.

De acuerdo con estos hallazgos, se puede concluir que son los meses de julio-agosto, es decir, el peak de caudal pluvial el que se muestra más afectado en cuanto al estado de los cultivos. Ya que, para 1986 se mostraba como un periodo con grandes extensiones en categorías como “sequía muy baja” o “baja” mientras que para el año 2023 su condición cambia a ser los meses de estudio con la mayor de extensión de cultivos en categorías de “sequía alta” y “muy alta”. Lo anterior es coherente con CIREN y sus datos de caudal promedio (<https://anidlimarichoapa.ciren.cl>), donde se observa que también son los meses de invierno donde se registra la menor disponibilidad hídrica, mientras que los meses estivales, se caracterizan por mayor disponibilidad y uso. En la misma línea, estos hallazgos son consistentes con estudios previos como Bolados et al., (2016) y Ferrando (2002), que, si bien

utilizan una metodología ligada a variables cualitativas y descriptivas, concuerdan en indicar que en la zona de estudio existe una situación crítica en cuanto a la disponibilidad del recurso hídrico, su utilización y distribución, y cómo esto afectaría principalmente a la población agricultora.

Independiente de la situación crítica de los cultivos y la disponibilidad de agua en la cuenca, hoy en día las cosechas continúan siendo en su mayoría productos de exportación, lo cual refuerza aún más los lineamientos de un modelo de producción instaurado que sigue vigente, priorizando la rentabilidad económica por sobre la seguridad hídrica (Alvarez-Garretón, et al., 2023) y alimentaria. De no cambiar esta visión extractivista, que ya no se desarrolla bajo las condiciones de una cuenca equilibrada en cuanto a su oferta-demanda, los impactos socioeconómicos y ambientales podrían ser catastróficos. En la misma línea, es importante reiterar la idea de que la situación de aridez de la zona difícilmente pueda revertirse. Es condicionante el desequilibrio que existe en la cuenca en cuanto a la disponibilidad y usos destinados al agua. En este sentido, la demanda que busca satisfacer tanto las necesidades básicas de la población, como los requerimientos de la agricultura, sin mencionar a los ecosistemas naturales, supera con creces la oferta de la cuenca (Ferrando, 2002). Representando un desafío para la sostenibilidad ambiental y el bienestar de las comunidades locales. Bajo este escenario, resulta urgente delinear estrategias que promuevan impactos positivos en el territorio, de modo que la tensión ambiental pueda abordarse en vista de continuar con labores que dialoguen con la agricultura histórica del sector sin generar un mayor perjuicio (Bolados, et al., 2016), incluyendo cambios en las prácticas de agricultura y/o desarrollo de actividades turísticas resilientes al cambio climático. En la misma línea, es crucial implementar una gobernanza territorial donde exista una mayor cooperación entre Estado y actores no estatales en redes decisionales mixtas que combinen elementos de ambas esferas (Mayntz, 2000 en Fernández-Tabales y Navarro-Jurado, 2022). Esto permitirá que las políticas públicas y sus medios de implementación se delinee situadamente, considerando oportunidades y limitaciones que se ajustan a la realidad territorial y que prioricen la distribución más equitativa de recursos, la sostenibilidad y el bien común (Fernández-Tabales y Navarro-Jurado, 2022).

Superar la crisis hídrica requiere no necesariamente un aumento en las precipitaciones, sino que la implementación estratégica de cambios en las prácticas relacionadas a los usos de aguas. Un caso de estudio relevante para establecer comparaciones en este sentido corresponde a la trayectoria del valle del Elqui. Este valle es colindante con nuestra área de estudio, presentando además características bioclimáticas y productivas equivalentes. Precisamente, en ambos valles el sector agroindustrial ha crecido exponencialmente con la liberalización económica, particularmente orientada a proveer nacional e internacionalmente frutas fuera de temporada (Nicolas-Artero et al., 2018). En la perspectiva histórica, el valle del Elqui también posee una larga tradición en el cultivo de la vid, sumándose además la producción de vino y otros destilados (Lacoste y Navarrete, 2014). Sin embargo, el valle del Elqui durante la segunda parte del siglo XX diversificó su producción agrícola y vitícola a través de la extensión de las superficies cultivadas bajo riego tras la construcción del embalse Puclaro en 1999. Esta diversificación se alcanzó además con la incorporación de nuevas tecnologías para el riego y

el fomento del turismo. Bajo este escenario, el vínculo entre agricultura y turismo en el valle del Elqui se ha consolidado, lo que ha determinado su declaración oficial como Zona de Interés Turístico (ZOIT). Dicha declaración ha llevado a impulsar el turismo a través de un plan de acción orientado a la conservación del patrimonio natural y cultural del valle, atraer inversión, garantizar la calidad de los servicios y mejorar la infraestructura de apoyo al sector (Sernatur, 2018). Así, este caso de estudio sugiere que el turismo rural constituya un complemento económico a las actividades agrícola (Lacoste y Navarrete, 2014). En efecto, en el valle del Elqui las familias han encontrado una forma no tradicional de generar ingresos, fortalecer su identidad, y jerarquizar las labores del campo, al valorarlas y abrirlas al contacto directo del público de las zonas urbanas.

Al igual que el valle del Elqui, en la cuenca del Limarí se han desplegado históricamente diferentes elementos que podrían ser aprovechados en otros rubros. Dentro de ellas está el turismo, del cual se pueden desglosar agroturismo, astroturismo, trekking y opciones como el cicloturismo (Araya y Varas, 2018). Si bien esta opción conllevaría a una mayor presión hídrica por el aumento de viajeros, esta debe ser vista como un complemento a las otras medidas a discutir, pues lo relevante es que el abanico de opciones económicas de las familias aumente.

Sumado al punto anterior y debido a que en la cuenca del Limarí la agricultura ha sido una actividad tradicional basada en el manejo de diversas plantaciones, la implementación de nuevos cultivos podría también ser una alternativa viable. Esta opción es importante que se lleve a cabo considerando el escenario hidrológico actual y futuro, en cuanto determinan la disponibilidad de agua para riego. Precisamente, considerando los requerimientos hídricos de aquellos nuevos cultivos. Asimismo, es importante ajustar las prácticas agrícolas, para evitar o minimizar la exposición de los cultivos a situaciones de escasez de agua (Comisión Nacional de Riego, 2020). Una opción puede ser el cultivo de quinoa, el cual se ha desarrollado en el norte árido y semiárido de Chile desde tiempos precolombinos debido sus bajos requerimientos hídricos (INIA, 2015). Esta práctica podría complementarse con la utilización de mulch orgánico -i.e., depositación de residuos de la temporada anterior sobre el suelo permitiendo disminuir la evaporación directa, aumentar la proporción de agua que es transpirada por el cultivo, y disminuir los riesgos de erosión (Comisión Nacional de Riego, 2020).

Una última consideración se relaciona con la gestión del agua en la cuenca, Bolados et al. (2016) señala que el 55,5% de los derechos de agua pertenecen a 20 comuneros de un total aproximado de 1500 usuarios/as. Asimismo, comuneros concentran poco más del 25% de las acciones de toda la cuenca (Fuentes y Salinas, 2009), y la Compañía Minera Barrick Chile Ltda cuenta con una importante cantidad de acciones que, en caso de presentar un proyecto minero, destinaría un gran volumen de aguas de riego a procesos mineros industriales. Lo anterior, necesariamente pone en riesgo tanto la calidad como la cantidad de agua de la cuenca, afectando gravemente la actividad agrícola (Fuentes y Salinas, 2009). Ante esta situación de desigualdad dada por el mercado de aguas derivado del Código de Aguas de 1981, se produciría una dinámica asimétrica del acceso a la misma (Bolados et al., 2016). Bajo este escenario, se vuelve urgente implementar cambios constitucionales que garanticen una distribución

equitativa de los derechos de agua, especialmente en contextos donde la seguridad hídrica de la población se encuentra comprometida.

Potenciar el turismo, implementar cultivos de bajo requerimiento hídrico y considerar una redistribución de los derechos de agua aparecen como opciones para el valle de Limarí.

En paralelo, el gobierno central de Chile ha anunciado un paquete de medidas para implementar ante la crisis hídrica de Coquimbo, entre ellas está; una planta desaladora en Elqui o Limarí, ley corta que faculte al Ministerio de Obras Públicas a construir plantas desaladoras, pozos de agua dulce para consumo humano y planta de tratamiento de aguas servidas para riego (Gobierno de Chile, 2023). Si bien esto implica voluntades políticas para abordar la crisis hídrica, es importante reconocer que ante la aridez que caracteriza al área de estudio resulta necesario un cambio de prácticas y no soluciones que puedan traer un mayor perjuicio y deterioro al territorio.

En efecto, cualquier tipo de intervención debiese orientarse a reducir la dependencia económica a un solo rubro que, en sí mismo, se concentra en pocos cultivos, abriendo nuevas opciones de empleo y oportunidades para la población. De acuerdo con Bolados et al. (2016), las expectativas de la población se reducen principalmente al anhelo de mantenerse en el territorio conservando las actividades que se han realizado históricamente, de manera tranquila y sin presiones.

Para finalizar, si bien esta memoria exploratoriamente revela que la condición socioambiental actual de la cuenca del Río Limarí demanda acciones inmediatas y efectivas, este estudio cuenta con algunas limitaciones que deben ser superadas desde el punto de vista metodológico. Particularmente, para así cuestionar el modelo de producción que predomina en el área de estudio y otros valles del Norte-Chico. Esta investigación revela tendencias que dan cuenta de condiciones que no favorecen las actividades agrícolas de la cuenca debido al sostenido deterioro tras la prolongada mega sequía. Sin embargo, estas inferencias se basan solo en la aplicación de índices diferenciales normalizados para evaluar estados ecológicos del sistema. Esto implica que las interpretaciones pueden basarse en subestimaciones debido a que la caracterización aquí desarrollada no considera otros indicadores que son críticos para en el crecimiento y desarrollo de cultivos, tales como características fisicoquímicas del suelo, cantidad de materia orgánica y nutrientes y calidad del agua de riego. En esta línea, tampoco se realizó un levantamiento territorial sobre testimonios y relatos, limitando aún más la comprensión integral de la situación agrícola en la cuenca. Por tanto, resulta necesario afinar los resultados e inferencias derivadas de este estudio mediante el diseño de investigaciones futuras enfocadas en la evaluación cuali y cuantitativa del impacto de otras variables climáticas de relevancia para la agricultura (e.g. temperaturas extremas, humedad relativa, evaporación, etc). Del mismo modo, resulta fundamental desarrollar perspectivas prospectivas mediante la implementación de modelaciones que permitan anticipar posibles impactos relacionados con diferentes eventos climáticos extremos (mega sequía, precipitaciones intensas, olas de calor, heladas tardías) y otros fenómenos relacionados como inundaciones, remociones en masa, expansión de plagas, entre otros.

Capítulo 5: Conclusiones

Los resultados obtenidos en esta memoria dan cuenta de un deterioro progresivo en el estado de los cultivos en el valle del Limarí desde 1986 hasta 2023. Específicamente, este estudio exploratorio proporciona evidencia en cuanto a la evolución y estado de los cultivos en el valle del Limarí, destacando condiciones tanto de vigorosidad como de humedad retenida en la vegetación, lo que determina un estado no saludable de los cultivos. De esta manera, el ejercicio aquí realizado debe considerarse como una contribución a una línea de base histórica y actualizada para documentar y cuantificar los cambios en la cobertura vegetal a lo largo del tiempo, en función de identificar áreas específicas donde los cultivos y el estado de la vegetación ha disminuido considerablemente.

Es crucial priorizar las áreas que han experimentado cambios negativos en su estado al momento de planificar intervenciones, las cuales debiesen implementar estrategias de monitoreo que se alimenten de herramientas y perspectivas aquí levantadas. Para esto el foco se debe poner en buscar instrumentos y elementos que lleven a cambios en las prácticas actuales. Específicamente, en cuanto a cómo sostener actividades productivas en áreas que emergen como críticas en términos de deterioro, que se asocian tanto a actividades humanas como a cambio climático.

Las recomendaciones para el área de estudio aquí discutidas podrían ser un elemento inicial que promueva el diálogo entre quienes habitan y se desenvuelven en el territorio con expertos en desarrollo territorial. Es relevante que continuamente se esté estudiando, discutiendo y debatiendo acerca de las tendencias que se presenten en el área de estudio. Con esto se podrán desplegar mejores adaptaciones y estrategias de diversificación que logren disminuir la vulnerabilidad de la población ante la crisis hídrica y próximos desafíos ambientales.

Es importante subrayar la necesidad de que las acciones a implementar sean coordinadas de manera multidisciplinaria, en vías de subsanar cualquier tipo de sesgo existente y asegurar la efectividad de las intervenciones. Este enfoque permitiría una comprensión más integral y una mejor preparación ante futuros desafíos.

Referencias

- Aldás, A. (2019). ANÁLISIS DE LA DINÁMICA TEMPORAL DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI) PARA LOS AÑOS 1986, 2001 Y 2017 EN LA RESERVA ECOLÓGICA COTACACHI CAYAPAS, IMBABURA, MEDIANTE EL USO DE GOOGLE EARTH ENGINE.
- Alvarez-Garreton, C., Boisier, J.P., Blanco, G., Billi, M., Nicolas-Artero, C., Maillet, A., Aldunce, P., Urrutia-Jalabert, R., Zambrano-Bigiarini, M., Guevara, G., Galleguillos, M., Muñoz, A., Christie, D., Marinao, R., & Garreaud, R. (2023). Seguridad Hídrica en Chile: Caracterización y Perspectivas de Futuro. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia CR2, (ANID/FONDAP/1522^a0001), 72 pp. Disponible en www.cr2.cl/seguridadhidrica
- Alvarez-Garreton, C., Boisier, J., Garreaud, R., González, J., Rondanelli, R., Gayó E., y Zambrano-Bigiarini, M. (2024). *HESS Opinions: The unsustainable use of groundwater conceals a “Day Zero”*. hess-28-1605-2024.pdf ([copernicus.org](https://www.copernicus.org))
- Araya, S., & Varas, C. (2018). Cicloturismo como alternativa estratégica para la promoción del turismo sustentable de localidades rurales del Valle de Elqui, Chile. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-235X2018000200170&script=sci_arttext
- Banco Mundial. (2021). Lo que hay que saber sobre el cambio climático y las sequías. [Serie explicativa sobre el cambio climático: Cambio climático y sequías \(bancomundial.org\)](https://www.bancomundial.org/es/publication/serie-explicativa-sobre-el-cambio-climatico-cambio-climatico-y-sequias)
- Biblioteca del Congreso Nacional. (2019). “Mega Sequía”. [Mega Sequía — \(bcn.cl\)](https://www.bcn.cl)
- Bolados, M., Gómez, A., & Silva, M. I. (2016, 11 23). CARACTERIZACIÓN DE LAS TENSIONES SOCIOAMBIENTALES GENERADAS A PARTIR DE LA ESCASEZ HÍDRICA EN EL VALLE DEL LIMARÍ. *Fundación Habitar*. https://www.researchgate.net/profile/Maximiliano-Bolados-Arratia/publication/325056000_Tensiones_socioambientales_asociadas_a_la_escasez_hidrica_en_el_Valle_del_rio_Limari_Region_de_Coquimbo_Chile/links/5af3da140f7e9b026bcc728d/Tensiones-socioambientales-a
- Cabeza, R., Cepeda, J., Bodini, A. (2007). DESCRIPCIÓN CARTOGRÁFICA DE LA HOYA HIDROGRÁFICA DEL RÍO ELQUI (REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE). [Impresión de fotografía de página completa \(parc.ca\)](https://www.parc.ca)
- Campaña-Olaya, J., Tafur, E. (2021). Análisis multitemporal del NDDI, comparación con el NDWI para determinar la sequía en la Reserva Nacional de Tumbes, Perú, 1986 – 2019. [Análisis multitemporal del NDDI, comparación con el NDWI para determinar la sequía en la Reserva Nacional de Tumbes, Perú, 1986 - 2019 | Campaña-Olaya | Manglar \(untumbes.edu.pe\)](https://www.untumbes.edu.pe)
- Cáceres, S. (2021). Propuesta para una estrategia de gestión territorial contra la desertificación y la sequía en la comuna de Los Vilos, Región de Coquimbo. [Propuesta para una estrategia de gestión territorial contra la desertificación y la sequía en la comuna de Los Vilos, Región de Coquimbo \(uach.cl\)](https://www.uach.cl)
- Cataya, S., Alfaro, S., Rodríguez E., Montalvo, V. (2014). [Vista de Comparación de técnicas para determinar cobertura vegetal y usos de la tierra en áreas de interés ecológico, Manabí, Ecuador \(udistrital.edu.co\)](https://www.udistrital.edu.co)

- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. (2023). *Sequías y Seguridad Hídrica en Chile*. anidsequias.meteodata.cl/monitor/
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. (2015, 11). *La megasequía 2010-2015: una lección para el futuro*. La megasequía 2010-2015: una lección para el futuro. <https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2015/11/informe-megasequia-cr21.pdf>
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. (2019). *El antropoceno en Chile: evidencias y formas de avanzar*. <https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2019/06/Informe-Antropoceno-castellano.pdf>
- Ceroni, M., Achkar, M., Gazzano, I., & Burgueño, J. (2015). Estudio del NDVI mediante análisis multiescalar y series temporales utilizando imágenes SPOT, durante el período 1998-2012 en el Uruguay. *Revista de Teledetección*. <https://polipapers.upv.es/index.php/raet/article/view/3683/4113>
- CIREN. (s.f.). Análisis de la relación oferta-demanda del agua de riego para un mejor manejo de los recursos hídricos en las cuencas del Limarí y Choapa. <https://anidlimarichoapa.ciren.cl/>
- CIREN. (2021). Análisis de la relación oferta-demanda del agua de riego para un mejor manejo de los recursos hídricos en las cuencas del Limarí y Choapa. [Terrenos Agrícolas | Observatorio Institucional CIREN](https://www.ciren.cl/observatorio-institucional-ciren)
- CIREN. (2023). Análisis de la relación oferta-demanda del agua de riego para un mejor manejo de los recursos hídricos en las cuencas del Limarí y Choapa. <https://anidlimarichoapa.ciren.cl/>
- Comisión Nacional de Riego. (2020). *ALTERNATIVAS DE CULTIVOS DE BAJO REQUERIMIENTO HÍDRICO*. <https://www.chileagricola.cl/alternativas-de-cultivos-de-bajo-requerimiento-hidrico/>
- Congreso ACADES. (2024). Congreso ACADES: La relevancia que tiene la agricultura para nuestro país, tanto para su consumo como para su gestión agroexportadora, es importante. [Congreso ACADES: La relevancia de la agricultura \(portalfruticola.com\)](https://portalfruticola.com/congreso-acades)
- DGA. (2004). *Cuenca del Río Limarí*. <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Limari.pdf>
- DGA. (2020). *Informe técnico: Diagnóstico del estado hidrogeológico de la cuenca del Limarí*. <https://snia.mop.gob.cl/repositorioldga/bitstream/handle/20.500.13000/7041/SUB5886.pdf>
- Dobri, R., Sfica, L., Amihaesei, V., Apostol, L., Timpu, S. (2021). Drought Extent and Severity on Arable Lands in Romania Derived from Normalized Difference Drought Index (2001–2020). [Remote Sensing | Free Full-Text | Drought Extent and Severity on Arable Lands in Romania Derived from Normalized Difference Drought Index \(2001–2020\) \(mdpi.com\)](https://www.mdpi.com/2072-4267/13/11/2200)
- Du, Tien Le Thuy, Duong Du Bui, Minh Duc Nguyen, Hyongki Lee. (2018). "Satellite-Based, Multi-Indices for Evaluation of Agricultural Droughts in a Highly Dynamic Tropical Catchment, Central Vietnam" *Water* 10, no. 5: 659. <https://doi.org/10.3390/w10050659>
- Emol. (2024). *Sequía en Coquimbo: Las implicancias de ser declarada una zona de riesgo sanitario y las otras comunas en peligro*.

<https://www.emol.com/noticias/Nacional/2024/03/25/1125859/coquimbo-sequiariesgo-sanitario.html>

- FAO. (2024). *Manejo proactivo de la sequía*. <https://www.fao.org/climate-smart-agriculture/knowledge/practices/drought/es/>
- FAO. (2021). El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura - Sistemas al límite. Informe de síntesis 2021. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb7654es>
- Ferrando, F. (2002). *Cuenca del Río Limarí, Chile Semiárido: Aspectos de la oferta y demanda del agua*. <http://tallerdeletras.letras.uc.cl/index.php/RGNG/article/view/42867/34697>
- Fernández, F., Vasquez, F., Ponce, R., Garreaud, R., Hernández, F., Zambrano, F y Hanemann, M. (2023). *The economics impacts of long-run droughts: Challenges, gaps, and way forward*. [The economics impacts of long-run droughts: Challenges, gaps, and way forward - ScienceDirect](#)
- Fernández-Tabales, A y Navarro-Jurado, E. (2022). *Nuevos enfoques en la geografía del turismo: gobernanza e inteligencia territorial como últimas fases en la evolución de la gestión turística del litoral*. [Nuevos enfoques en la geografía del turismo: gobernanza e inteligencia territorial como últimas fases en la evolución de la gestión turística del litoral \(uab.cat\)](#)
- Fundación Aquae. (2016). *Impacto de la sequía en la agricultura*. <https://www.fundacionaquae.org/impacto-de-la-sequia-en-la-agricultura/>
- Garreaud, R., Boisier, J., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepulveda, H., y Veloso-Aguila, D. (2019). *The central Chile Mega Drought (2010-2018): A climate dynamics perspective*. [The Central Chile Mega Drought \(2010–2018\): A climate dynamics perspective - Garreaud - 2020 - International Journal of Climatology - Wiley Online Library](#)
- GÓMEZ, M. 2005. Índice de Vegetación en Áreas del Bosque Seco del Noroeste del Perú a partir de Imágenes Satelitales. Tesis para optar el Título de Ingeniero industrial y de Sistemas. Facultad de Ingeniería. Área Departamental de Ciencias de la Ingeniería. Universidad de Piura. Perú. (Pág. 43-44)
- Sebem, E., Gonzales, C., García, R., Vega, R., Valverde, A. (2005). Aportación del NDVI y los sistemas expertos en la mejora de la clasificación temática de imágenes multiespectrales. [2763-libre.pdf \(d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net\)](#)

- Google. (2024). *Análisis a nivel planetario en la nube de Google*. https://www.google.com/intl/es_ALL/earth/education/tools/google-earth-engine/
- Gobierno de Chile. (2023). *Crisis hídrica en Región de Coquimbo: Presidente anuncia un paquete de medidas*. <https://www.gob.cl/noticias/crisis-hidrica-en-region-de-coquimbo-presidente-anuncia-un-paquete-de-medidas/>
- Gómez, A., Bracho, M., Rodríguez, L., Acosta, Y. (2012). *El agroturismo como opción de diversificación económica en la comunidad de Yaracal, estado Falcón*. [Redalyc.El agroturismo como opción de diversificación económica en la comunidad de Yaracal, estado Falcón](https://redalyc.org/El-agroturismo-como-opcion-de-diversificacion-economica-en-la-comunidad-de-Yaracal-estado-Falcon)
- Guzmán, D. (2021). *CÁLCULO DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA - NDVI USANDO LA PLATAFORMA GOOGLE EARTH ENGINE PARA LOS AÑOS 2019 Y 2020 DE LA VEREDA LA FLORIDA EN EL MUNICIPIO DE PUERTO ASÍS*. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/40417/GuzmanArevaloDiegoFelipe2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Herawati, A., Mujiyo, M., Nubroho, B., Istiqomah, N., Irmawati, V., Hasanah, K., Anggita, A. (2024). *Drought potential index using Normalized Difference Drought Index (NDDI) method based on Geographical Information System (GIS) in Slogohimo, Wonogiri Indonesia*. [Open Access proceedings Journal of Physics: Conference series \(iop.org\)](https://iop.org)
- INE. (2021). *VIII Censo Nacional Agropecuario y Forestal*. <https://www.ine.gob.cl/censoagropecuario/resultados-finales/graficas-regionales>
- INIA. (2009). *Valle del Limarí, un aporte a la fruticultura chilena*. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/5052/NR35942.pdf?sequence=1>
- INIA. (2012). *Riego en mandarinos y paltos*. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/7513/Bolet%20n%2013%20A%20N%20c%20b%2020240?sequence=1&isAllowed=y>
- INIA. (2020). *Sanidad Vegetal: Un aporte de INIA a la protección de las plantas*. [TA113 \(inia.cl\)](https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/6727/Bolet%20n%2013%20A%20N%20c%20b%2020240?sequence=1)
- Jensen, M., Bouteiller, M., & Zeinsteger, E. (2010). *Diversificación económica de los establecimientos rurales de tierra del fuego*. <https://nulan.mdp.edu.ar/id/eprint/224/1/Apo1998a2v2pp53-69.pdf>
- INIA. (2015). *El cultivo de la quínoa en Chile*. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/6727/Bolet%20n%2013%20A%20N%20c%20b%2020240?sequence=1>

- Larrain, S. (2021). *Código de Aguas y Nueva Constitución: transformaciones que no pueden esperar*. <https://www.derechoalagua.cl/2021/07/codigo-de-aguas-y-nueva-constitucion-transformaciones-que-no-pueden-esperar/>
- Lozano-Parra, J. (2018). Recursos hídricos. Disponibilidad, variabilidad y gestión. *Revista de geografía Norte Grande*. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34022018000300005
- Lacoste, P., & Navarrete, S. (2014). *Alternativas no tradicionales de desarrollo rural: la Ruta del Pisco como recurso turístico (valle de Elqui, Chile)*. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-34292014000400002&script=sci_arttext
- Ministerio de Agricultura. (2024). *Gobierno analiza medidas de emergencia para mitigar los efectos de la escasez hídrica en la provincia de Limarí*. <https://minagri.gob.cl/noticia/gobierno-analiza-medidas-de-emergencia-para-mitigar-los-efectos-de-la-escasez-hidrica-en-la-provincia-de-limari/>
- Morales, L., Canessa, F., Mattar, C., Orrego, R., Matus, F. (2006). CARACTERIZACIÓN Y ZONIFICACIÓN EDÁFICA Y CLIMÁTICA DE LA REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE. [CARACTERIZACIÓN Y ZONIFICACIÓN EDÁFICA Y CLIMÁTICA DE LA REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE \(scielo.cl\)](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292006000400002)
- Nicolas-Artero, C., Velut, S., & Aliste, E. (2018). *La expansión del capitalismo en el valle de Elqui: viejas reglas y nuevos espacios*. https://www.researchgate.net/profile/Chloe-Nicolas-Artero/publication/325853878_La_expansion_del_capitalismo_en_el_valle_de_Elqui_viejas_reglas_y_nuevos_espacios_The_expansion_of_capitalism_in_Elqui_valley_or_ld_rules_and_new_spaces/links/5b2905df4585150c63d

- Novoa, J. E., & Lopez, D. (2001). *IV Cuarta Region: El escenario geográfico y físico*. <http://www.biouls.cl/Irojo/Manuscrito/Capitulo%2002%20Escenario%20Geografico.PDF>
- OCDE. (2021)., *La ayuda para el comercio en síntesis 2019: Apoyar la diversificación y el empoderamiento económicos*. <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/79394efees.pdf?expires=1710255938&id=id&accname=guest&checksum=07BC24F1FB4311DAC146E7EB9257DDC3>
- ODEPA. (2013). *Contrastes socioproductivos en la agricultura chilena según su orientación a mercados: brechas y desafíos para un sector exportador inclusivo*. <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2013/06/contrastesSocioProductivos2013.pdf>
- ODEPA. (2017). *Agricultura Chilena Reflexiones y desafíos al 2030*. https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/01/ReflexDesaf_2030-1.pdf
- ODEPA. (2018). *Región de Coquimbo*. [Coquimbo.pdf \(odepa.gob.cl\)](#)
- ODEPA. (2020). *Región de Coquimbo*. <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2020/07/Coquimbo-.pdf>
- ODEPA. (2021). *Catastro frutícola*. https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/bitstream/handle/20.500.12650/71117/Coquimb_o202109.pdf?sequence=1
- ONU. (2013). *Abordar la seguridad hídrica ante el cambio climático*. [Abordar la seguridad hídrica ante el cambio climático | Naciones Unidas](#)
- Ottoniel de León, R., & Villatoro, B. (2017). *ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LA DEPENDENCIA ENTRE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN NDWI Y MSI OBTENIDOS DE IMÁGENES DE SATELITE LANDSAT 8, LA HUMEDAD DE LA*

<https://cengicana.org/files/20170927140015724.pdf>

- Patil, P., Jagtap, M., Kratri, N., Maddan, H., Vadduri, A., Patodia, T. (2024). Exploration and advancement of NDDI leveraging NDVI and NDWI in Indian semi-arid regions: A remote sensing-based study. [Exploration and advancement of NDDI leveraging NDVI and NDWI in Indian semi-arid regions: A remote sensing-based study - ScienceDirect](#)
- Parga, F., León, A., Vargas, X., & Fuster, R. (2006). *El índice de pobreza hídrica aplicado a la cuenca del Río Limarí en Chile semiárido*. Eval. Usos del Agua en Tierras Secas de Iberoamérica 93-109
- Paredes, P., Maglione, D., Sandoval, M., Soto, J., Bonfili., O., Humano, G. (2022). RELACIÓN ENTRE ÍNDICES DE SEQUÍA USANDO DATOS METEOROLÓGICOS Y SATELITALES, EN LA ESTEPA MAGALLÁNICA SECA (PATAGONIA) [Vista de RELACIÓN ENTRE ÍNDICES DE SEQUÍA USANDO DATOS METEOROLÓGICOS Y SATELITALES, EN LA ESTEPA MAGALLÁNICA SECA \(PATAGONIA\) \(uba.ar\)](#)
- Quispe, B y Révolo, R. (2020). Temperatura superficial y estado de la vegetación del bosque de *Polylepis* spp, distrito de San Marcos de Rocchac, Huancavelica – Perú. [572263177013.pdf \(redalyc.org\)](#)
- Robles, C. (2003). *Expansión y transformación de la agricultura en una economía exportadora. La transición al capitalismo agrario en Chile (1850-1930)*. https://www.historiaagraria.com/FILE/articulos/HA29_robles.pdf
- Salas-Martínez, F., Valdés-Rodríguez, O., Rodríguez-Hernandez, L. (2023). Methodological estimation to quantify drought intensity based on the NDDI index with Landsat 8 multispectral images in the central zone of the Gulf of Mexico. [Frontiers |](#)

[Methodological estimation to quantify drought intensity based on the NDDI index with Landsat 8 multispectral images in the central zone of the Gulf of Mexico \(frontiersin.org\)](#)

- Sernatur. (2018). *Comité de Ministros de Turismo declaran al Valle de Elqui como Zona de Interés Turístico*. <https://www.sernatur.cl/comites-de-ministros-de-turismo-declaran-al-valle-de-elqui-como-zona-de-interes-turistico/>
- Sobrino, J. (2000). *Teledetección*. <https://books.google.cl/books?hl=es&lr=&id=Yb6xIldfoT0C&oi=fnd&pg=PA89&dq=teledetecci%C3%B3n&ots=oTEHsyJD4n&sig=4trmlGDh-ZJMVAXGVWqepbgKN7w#v=onepage&q=teledetecci%C3%B3n&f=false>
- UNESCO. (2023). *Riesgo inminente de una crisis mundial del agua*. <https://www.unesco.org/es/articles/riesgo-inminente-de-una-crisis-mundial-del-agua-unesco/onu-agua>
- UNESCO. (2021). *El valor del agua*. <https://www.unesco.org/reports/wwdr/2021/es>
- USGS. (28 de Diciembre de 2018). USGS science for a changing world. Obtenido de <https://landsat.usgs.gov/landsat-collections>