



**Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Ambientales
Ingeniería Ambiental**

**Evaluación de los impactos del desarrollo energético eólico en el
rendimiento hídrico.**

Habilitación presentada para optar al título de
Ingeniera Ambiental

Belén Ignacia de Los Ángeles Muñoz Alarcón

Profesoras guía:

Dra. Yannay Casas Ledón

MSc. Makarena Henríquez Ávila

CONCEPCIÓN (Chile), 2025

Universidad de Concepción

Evaluación de los impactos del desarrollo energético eólico en el rendimiento hídrico.

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniera Ambiental

Alumna: Belén Ignacia de Los Ángeles Muñoz Alarcón

Profesoras guía: Dra. Yannay Casas Ledón

MSc. Makarena Henríquez Ávila

CONCEPCIÓN (Chile), 2025

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|---|----|
| 1. Agradecimientos | 7 |
| 2. Resumen | 8 |
| 3. Introducción | 10 |
| 3.1. Problemática | 10 |
| 3.2. Pregunta de Investigación | 11 |
| 3.3. Objetivos | 11 |
| 3.3.1. Objetivo general | 11 |
| 3.3.2. Objetivos específicos | 11 |
| 4. Antecedentes | 12 |
| 4.1. Desarrollo energético..... | 12 |
| 4.1.1. Transición energética en el mundo y Chile | 12 |
| 4.1.2. Impacto de las energías renovables..... | 14 |
| 4.2. Servicios ecosistémicos..... | 15 |
| 4.2.1. Definición de los Servicios Ecosistémicos | 15 |
| 4.2.2. Impactos del desarrollo eólico en los servicios ecosistémicos..... | 16 |
| 4.3. Rendimiento hídrico..... | 17 |
| 4.3.1. Concepto de rendimiento hídrico y factores que lo afectan | 17 |
| 4.3.2. Interacción entre el rendimiento hídrico y la energía eólica | 20 |
| 5. Metodología | 21 |
| 5.1. Área de estudio | 21 |
| 5.2. Escenarios de desarrollo energético eólico..... | 22 |
| 5.2.1. Potencial eólico en el área de estudio | 22 |
| 5.2.2. Elaboración de escenarios | 24 |
| 5.3. Rendimiento hídrico anual de InVEST | 25 |
| 5.4. Datos de entrada al modelo de rendimiento hídrico anual | 28 |
| 5.4.1. Manejo de datos para el modelo de rendimiento hídrico anual..... | 29 |

| | |
|--|----|
| 5.4.2.Precipitación media anual | 30 |
| 5.4.3.Evapotranspiración de referencia | 30 |
| 5.4.4.Uso/cobertura del suelo (LULC) | 31 |
| 5.4.5.Profundidad de la capa que restringe a las raíces | 31 |
| 5.4.6.Contenido de agua disponible para la planta (PAWC) | 31 |
| 5.4.7.Tabla biofísica | 32 |
| 5.4.8.Parámetro Z | 32 |
| 5.4.9.División de cuencas y subcuencas..... | 33 |
| 5.5.Índice hidroenergético | 33 |
| 6.Resultados y discusión | 34 |
| 6.1.Potencial eólico en el área de estudio | 34 |
| 6.2.Rendimiento hídrico anual en el área de estudio | 37 |
| 6.3.Índice hidroenergético | 40 |
| 7.Limitaciones del estudio | 44 |
| 7.1.Sobrestimación del modelo de rendimiento hídrico..... | 44 |
| 7.2.Potenciales efectos en la calidad del agua. | 46 |
| 7.3.Erosión producto de la actividad agrícola | 47 |
| 7.4.Captura y almacenamiento de carbono | 48 |
| 8.Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible | 50 |
| 9.Conclusiones | 51 |
| 10.Referencias..... | 53 |
| 11.Anexos | 60 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura N°1: Ejes prioritarios para la transición energética. | 12 |
| Figura N°2: Proyección de generación eléctrica por tipo de fuente para Chile [GWh]. | 13 |
| Figura N°3: Potenciales zonas de generación de energías renovables en Chile. | 14 |
| Figura N°4: Servicios ecosistémicos de acuerdo con la clasificación CICES v5.1..... | 16 |

| | |
|--|----|
| Figura N°5: Factores que afectan al rendimiento hídrico (simplificado). | 18 |
| Figura N°6: Regiones del Biobío y Ñuble con sus respectivos usos de suelo. | 21 |
| Figura N°7: Balance hídrico a escala de cuenca. | 25 |
| Figura N°9: Mapa de distribución geográfica del potencial eólico..... | 35 |
| Figura N°11: Usos de suelo en los escenarios base y futuro..... | 39 |
| Figura N°12: Transición de usos de suelo y variación del rendimiento hídrico (WY) entre escenarios. | 40 |
| Figura N°13: Distribución espacial del índice hidroenergético (HEI)..... | 42 |
| Figura N°14: Servicios ecosistémicos potencialmente ser afectados en el escenario de desarrollo eólico. | 44 |
| Figura N°15: Distribución del factor de planta de la cartera de proyectos eólicos en Chile..... | 62 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla N°1: Potenciales impactos sobre servicios ecosistémicos. | 17 |
| Tabla N°2: Impactos sobre el rendimiento hídrico en distintas áreas de estudio. | 19 |
| Tabla N°3: Factores TAT aplicados para la obtención de potencial eólico. | 23 |
| Tabla N°4: Definición de escenarios..... | 24 |
| Tabla N°5: Categorización de la variación del rendimiento hídrico entre los escenarios base y futuro. | 25 |
| Tabla N°6: Supuestos del modelo de rendimiento hídrico anual de InVEST. | 26 |
| Tabla N°7: Fuentes de datos para parámetros de entrada del modelo. | 28 |
| Tabla N°8: Parámetros de entrada, temporalidad y resolución espacial para el modelo AWY.... | 29 |
| Tabla N°9: Parámetros para estimación de la ETo. | 31 |
| Tabla N°10: Contenidos de la tabla biofísica. | 32 |
| Tabla N°11: Estaciones meteorológicas utilizadas en la estimación de N..... | 33 |
| Tabla N°12: Interpretación del índice hidroenergético (HEI) | 33 |
| Tabla N°13: Potencial eólico y superficie distribuido por provincia en MW..... | 34 |
| Tabla N°14: Potencia nominal aerogeneradores Vestas V117-3,3 MW y Vestas V126-3,3 MW. | 36 |

| | |
|--|----|
| Tabla N°15: Interpretación del índice hidroenergético (HEI) en escenario de cambio del rendimiento hídrico. | 42 |
| Tabla N°16: Contribución de la investigación a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). . | 50 |
| Tabla N°17: Proyectos eólicos en el área de estudio..... | 60 |
| Tabla N°18: Metodología de obtención de columnas de la tabla biofísica. | 66 |
| Tabla N°19: Usos de suelo por tipo de vegetación y coeficiente de cultivo..... | 67 |

1. AGRADECIMIENTOS

"Una lección sin dolor no tiene sentido. Eso es porque no se puede ganar algo sin sacrificar algo a cambio. Sin embargo, una vez que hayas soportado el dolor y lo hayas superado, ganarás un corazón que es más fuerte que todo lo demás. Un corazón de acero."- E.E.

En primer lugar, agradezco el financiamiento y apoyo de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), a través de los proyectos ANID/FONDECYT/1240055 y ANID/FONDAP/1523A0001.

A mis profesoras guía: Dra. Yannay Casas Ledón, quien siempre me recibió con mucha calidez y energía; y a MSc. Makarena Henríquez Ávila (futura Dra.), por todas las despedidas seguidas de un "ánimo", por su apoyo incondicional y por las millones de preguntas seguidas de un "no entiendo".

A Mamá y Papá, por creer en mí incluso cuando todo se veía borroso. Sus sonrisas de orgullo son lo único que necesito para seguir avanzando.

A mí amada Pepa, quien con una mirada tímida me recordaba que tengo que detenerme a sentir.

A las amistades que hice en el camino. Por alegrarme el día cuando lo único que quería era volver a mi casa a dormir, por los dibujos en clases y por las conversaciones en clase.

Finalmente, a Juan Pablo, quien me hizo ver que mis fracasos son solo una oportunidad para volver con más fuerza. Me faltan palabras para agradecerte por tu amor y paciencia. Te voy a amar por el resto de mi existencia.

2. RESUMEN

La expansión de la energía eólica se sitúa como uno de los pilares fundamentales para lograr la descarbonización de la matriz energética. Sin embargo, sus impactos sobre los servicios ecosistémicos, particularmente sobre el rendimiento hídrico, siguen siendo poco conocidos. Con este propósito, se planteó el objetivo de evaluar el impacto del escenario de desarrollo de energía eólica sobre el rendimiento hídrico.

El área de estudio son las regiones del Ñuble y Biobío, siendo esta última la tercera región con mayor potencial eólico según el Ministerio de Energía, mientras que la región del Ñuble ocupa el sexto lugar. Se espera que el desarrollo de las zonas con potencial eólico en el área de estudio contribuya a la matriz renovable nacional para lograr los compromisos de descarbonización.

Para lograr el objetivo propuesto, es necesario comparar un escenario base (condiciones actuales) con un escenario futuro (aprovechamiento pleno de áreas técnicamente aptas para el desarrollo eólico). La metodología utilizada combinó: (i) la delimitación espacial del potencial eólico, aplicando restricciones técnicas, ambientales y territoriales (TAT) y un umbral de factor de planta $\geq 0,22$; con (ii) una simulación hidrológica mediante el modelo de rendimiento hídrico anual de InVEST. El escenario futuro utilizó como supuesto que las superficies aptas para la instalación de aerogeneradores pasan en su totalidad a uso de suelo agrícola, práctica compatible con parques eólicos. Sobre esta base se estimó el cambio en el rendimiento hídrico (ΔWY) y se construyó un índice hidroenergético (HEI) que relaciona el rendimiento hídrico por MW instalado.

El análisis realizado indica que las regiones de Biobío y Ñuble concentran 18022 MW y 5306 MW de potencial eólico respectivamente. De toda la superficie con potencial, al convertir aquellas que corresponden a bosque o plantaciones forestales a uso agrícola se produce un aumento del rendimiento hídrico en la depresión central y la cordillera de la costa. La relación entre el rendimiento hídrico y el potencial eólico permitió estimar el índice hidroenergético (HEI), el cual evidencia los trade-offs o conflictos entre ambos servicios ecosistémicos. Este índice señala que las zonas con valores bajos del HEI son las más adecuadas para la instalación de proyectos eólicos, mientras que aquellas con valores elevados presentan un mayor nivel de conflicto y, en consecuencia, no debiesen priorizarse para dicho desarrollo.

Si bien el índice permite identificar espacialmente las zonas con mayor aptitud para el desarrollo eólico desde un enfoque de rendimiento hídrico anual, no considera una visión holística del territorio, ni incorpora la evaluación de otros servicios ecosistémicos, como lo son la calidad del agua, erosión o emisiones de carbono, los cuales también pudiesen verse afectados. Una de

principales limitaciones de este estudio proviene de la simplificación del escenario futuro, que asume una conversión total de la cobertura de suelo a terrenos agrícolas, ya que puede sobrestimar o subestimar los efectos reales sobre el rendimiento hídrico. Una medida efectiva ante esto es la incorporación de la ubicación puntual de aerogeneradores y sus fundiciones, con la finalidad de que los cambios en los usos de suelo sean focalizados y no en todo el territorio. Otra de las limitaciones principales radica en el modelo de rendimiento hídrico anual de InVEST, ya que no permite la diferenciación de otros componentes propios del balance hídrico (como el flujo base) y no integra otros servicios ecosistémicos en el análisis. Investigaciones futuras debiesen apuntar a modelar la dinámica de contaminantes y sedimentos en conjunto con el rendimiento hídrico, además de evaluar múltiples coberturas bajo escenarios de cambio climático, con el fin de obtener recomendaciones y resultados más robustos para la planificación energética y la gestión integradas del agua.

3. INTRODUCCIÓN

3.1. Problemática

El desarrollo de energías renovables resulta clave para mitigar los efectos del cambio climático y la dependencia de fuentes fósiles finitas (IRENA, 2023; Niño Villamizar et al., 2023). Dentro de las energías renovables, la energía eólica se ha posicionado como un pilar fundamental en las estrategias de descarbonización de la matriz energética debido, entre otras cosas, a su bajo nivel de emisiones y creciente competitividad ante otras fuentes de generación energética (IRENA, 2023; Ministerio de Energía, 2021b). En Chile, el potencial eólico identificado supera la capacidad instalada actual y la macrozona centro sur, que incluye las regiones de Ñuble y Biobío, cobran especial relevancia, ya que poseen condiciones favorables de viento, infraestructura y accesibilidad (Martínez-Martínez et al., 2023).

A pesar de las muchas ventajas que presenta la expansión de la energía eólica, su implementación territorial tiene impactos aún poco claros, sobre todo en términos medioambientales y relacionados con los servicios ecosistémicos, pudiendo afectar los usos de suelo, alterar el ciclo hidrológico y generar conflictos socioambientales producto de la transformación del territorio (Pratiwi & Juerges, 2020). La relación entre los servicios ecosistémicos y las energías renovables es compleja, ya que, si bien estas últimas son fundamentales para avanzar en materias de descarbonización de la matriz energética su desarrollo puede presionar recursos locales como el agua, sobre todo en zonas en las que la disponibilidad hídrica es un factor crítico para las comunidades y los ecosistemas.

En este contexto, el rendimiento hídrico, definido como la capacidad de una cuenca hidrográfica de generar y ofrecer agua en función de la precipitación, la evaporación y las características de los suelos (Carrasco-Valencia et al., 2024), constituye un servicio ecosistémico clave para evaluar la compatibilidad entre la expansión eólica y la sostenibilidad del recurso hídrico. Sin embargo, los estudios que analizan la relación entre estos dos factores es escasa, limitándose a investigaciones que abordan impactos sobre otros servicios ecosistémicos o a análisis de planificación territorial que no logran integrar por completo la dimensión hidrológica (Martínez-Martínez et al., 2023; Martínez, 2023; Muñoz et al., 2023).

La falta de estudios detallados significa una brecha relevante para la planificación territorial, dado que la implementación de proyectos eólicos implicaría, directa o indirectamente, reconfiguraciones en los usos de suelo, pudiendo modificar la disponibilidad hídrica a nivel de cuenca (Carrasco-Valencia et al., 2024).

3.2. Pregunta de Investigación

“¿Cuál es el cambio en el servicio ecosistémico de rendimiento hídrico asociado al desarrollo energético eólico en las regiones del Ñuble y Biobío?”

3.3. Objetivos

3.3.1. Objetivo general

Evaluar el impacto del escenario de desarrollo de energía eólica sobre el rendimiento hídrico en las regiones del Ñuble y Biobío.

3.3.2. Objetivos específicos

1. Elaborar escenarios de desarrollo energético eólico en las regiones de Ñuble y Biobío.
2. Estimar la variación del rendimiento hídrico de un escenario de desarrollo energético eólico y un escenario base en el área de estudio, utilizando modelos hidrológicos.
3. Determinar el impacto del desarrollo energético eólico sobre el rendimiento hídrico en comparación con un escenario base.

4. ANTECEDENTES

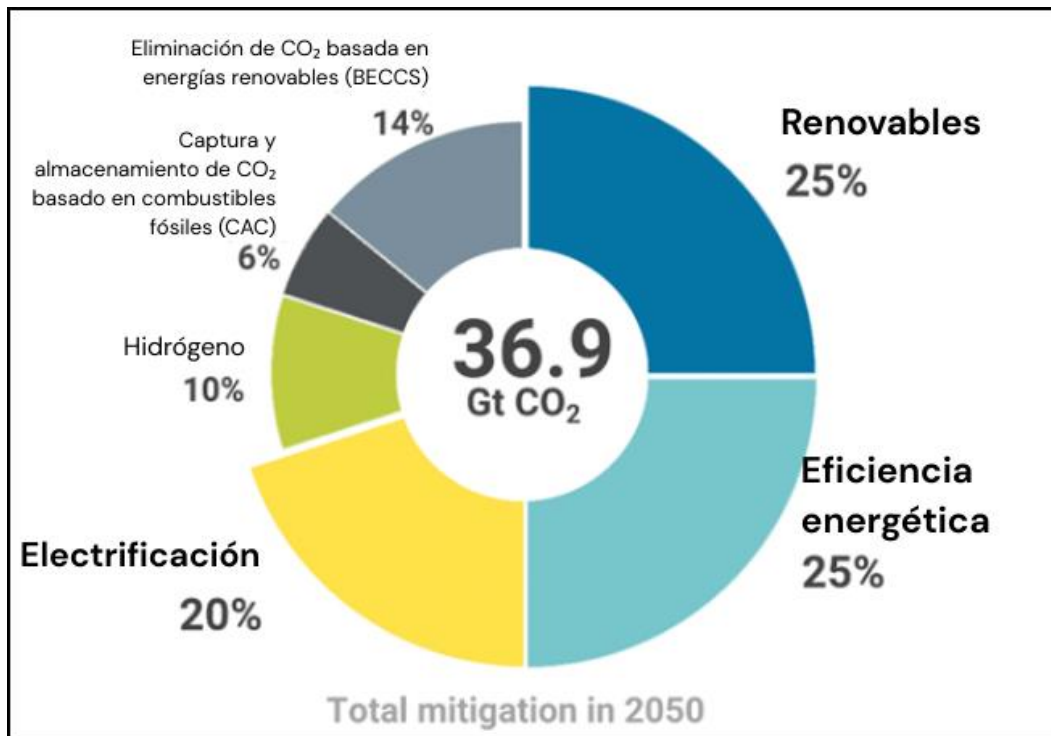
4.1. Desarrollo energético

4.1.1. Transición energética en el mundo y Chile

La transición energética se ha vuelto esencial debido a la incertidumbre sobre las reservas de energías fósiles (Picchi et al., 2019), pero por sobre todo debido a los impactos ambientales asociados a las emisiones de gases de efecto invernadero del sector energético, las cuales contribuyen fuertemente al calentamiento global (Niño Villamizar et al., 2023). Adicionalmente, un gran problema para transitar energéticamente son las barreras estructurales (como la falta de planificación integrada a largo plazo) que dificultan la implementación de energías renovables (IRENA, 2023). Si bien energías como la solar, hidráulica y eólica presentan una oportunidad para reducir la dependencia de recursos finitos y promover el desarrollo sostenible, su integración a gran escala en los sistemas energéticos actuales enfrenta obstáculos en cuanto a modernización y expansión de la infraestructura (IRENA, 2023).

Figura 1.

Ejes prioritarios para la transición energética.



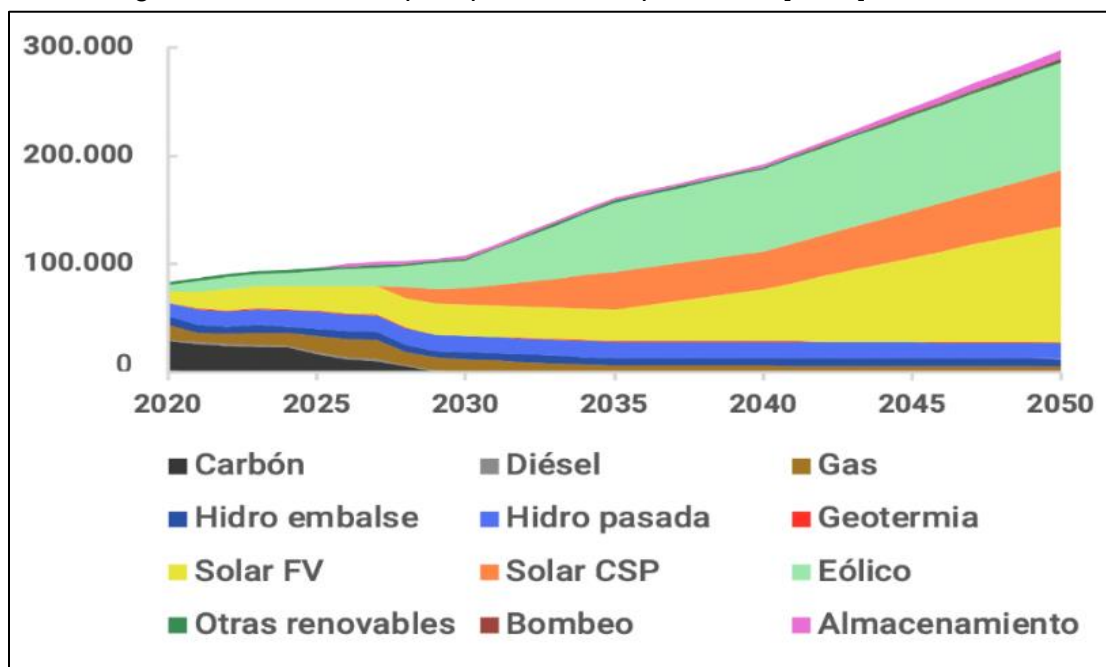
Fuente: IRENA (2023).

En este contexto, resulta indispensable trazar ejes prioritarios que orienten la transición energética hacia un modelo sostenible y resiliente. En la Figura N° 1, la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en inglés) menciona los ejes prioritarios para lograr descarbonizar la matriz energética al año 2050, y los principales están estrechamente vinculados al desarrollo de energías renovables y a la eficiencia energética (IRENA, 2023). Para Chile, alcanzar la descarbonización al año 2050 requiere una planificación a largo plazo, en que se deben proyectar al menos 30 años de oferta y demanda energética, asegurando que las infraestructuras eléctricas se adapten al crecimiento de las energías renovables (IRENA, 2023; Ministerio de Energía, 2021b).

El Plan de Energía de Largo Plazo 2023-2027 (PELP), elaborado por el Ministerio de Energía (2021b), propone cómo debe evolucionar la matriz energética para lograr los compromisos de descarbonización al año 2050, representada en la Figura N°2, basándose en la necesidad de aumentar la participación de energías renovables como la solar y eólica en la matriz energética.

Figura 2.

Proyección de generación eléctrica por tipo de fuente para Chile [GWh].



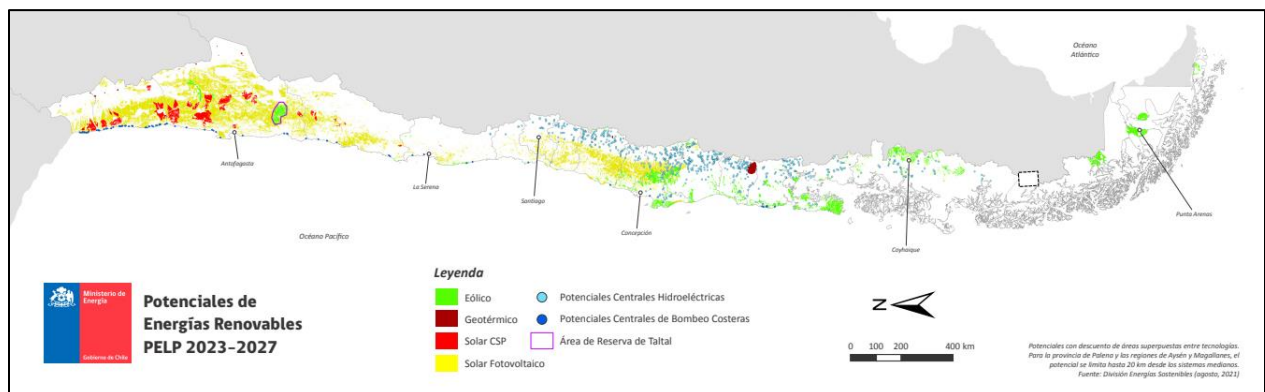
Fuente: Ministerio de Energía (2021b).

Según el Ministerio de Energía (2021a), en el informe sobre la “Identificación y Cuantificación de Potenciales de Energías Renovables”, el potencial bruto nacional de energías renovables se cuantifica en 2.153 GW, indicando que en la actualidad Chile cuenta con una capacidad de

generación eléctrica renovable mucho mayor a la instalada. La capacidad instalada renovable es de 14.899 MW, de las cuales 4.517 MW corresponden a parques eólicos (Comisión Nacional de Energía, 2024). La Figura N°2 demuestra que la energía eólica emerge como una de las principales fuentes de generación de energía renovable para cumplir con los compromisos de descarbonización al 2050. A continuación, la Figura N°3 evidencia que Chile cuenta con un gran potencial de generación de energía eólica, sobre todo en zonas como el centro-sur y la Patagonia, que cobran especial relevancia dadas sus condiciones geográficas y climáticas (Ministerio de Energía, 2021a).

Figura 3.

Potenciales zonas de generación de energías renovables en Chile.



Fuente: División Energías Sostenibles (2021).

Debido a sus condiciones favorables de viento, que permiten una generación eficiente de energía, las regiones de Ñuble y Biobío resultan esenciales para el estudio del potencial eólico. Particularmente, el Biobío tiene una velocidad de viento promedio de 6,2 m/s a 100 metros de altura, mientras que Ñuble tiene un promedio ligeramente inferior (Martínez-Martínez et al., 2023). La posibilidad e importancia de llevar a cabo proyectos de energía eólica en estas dos áreas radica en que la suma de sus recursos eólicos puede ayudar a diversificar la matriz energética de Chile, y así cumplir con sus metas de sostenibilidad.

4.1.2. Impacto de las energías renovables

En un contexto de creciente demanda a nivel mundial y la presión a los recursos naturales, las fuentes de energías renovables se presentan como soluciones viables para promover la descarbonización. No obstante, la implementación de estas no quedan exentas de impactos tanto ambientales, como por ejemplo, los cambios en el uso de suelo, pudiendo a afectar a actividades productivas como la agricultura; como sociales, pues afectan en gran medida el valor paisajístico de las zonas de implementación de energías renovables; y económicos, ya que contribuyen a

elevar la calidad de vida mediante la generación de empleo (Muñoz et al., 2023; Posso et al., 2014; Prados et al., 2012). En particular, el desarrollo de energías renovables ha ocasionado importantes impactos sobre la capacidad de proveer servicios ecosistémicos (Hastik et al., 2015).

La relación entre los servicios ecosistémicos y las energías renovables es compleja, ya que su implementación requiere grandes extensiones de terreno, lo que puede generar conflictos con otros usos de suelo (Turkovska et al., 2024). Por ejemplo, los servicios ecosistémicos potencialmente afectados por la energía solar pueden ser de aprovisionamiento, ya que pueden existir pérdidas de tierras, generalmente agrícolas, y los de regulación y mantenimiento, cuyos efectos pueden variar dependiendo del uso previo del suelo (Hastik et al., 2015). En cuanto a la energía hidráulica, se tiene que puede afectar a la disponibilidad hídrica, modificando las propiedades físicas e hidrológicas del ecosistema. Adicionalmente, los servicios culturales también se ven impactados, ya sea por la pérdida de paisajes naturales o la creación de zonas recreativas artificiales (Hastik et al., 2015). Por otra parte, la instalación de parques eólicos requiere la transformación de grandes extensiones de terreno, modificando los usos de suelo, llevando a una inminente deforestación o eliminación de la cubierta vegetal (Pratiwi & Juerges, 2020). Considerando esto, la vegetación puede verse afectada, lo que incrementaría la escorrentía superficial, comprometiendo a los ecosistemas (Carrasco-Valencia et al., 2024; Chen et al., 2024).

4.2. Servicios ecosistémicos

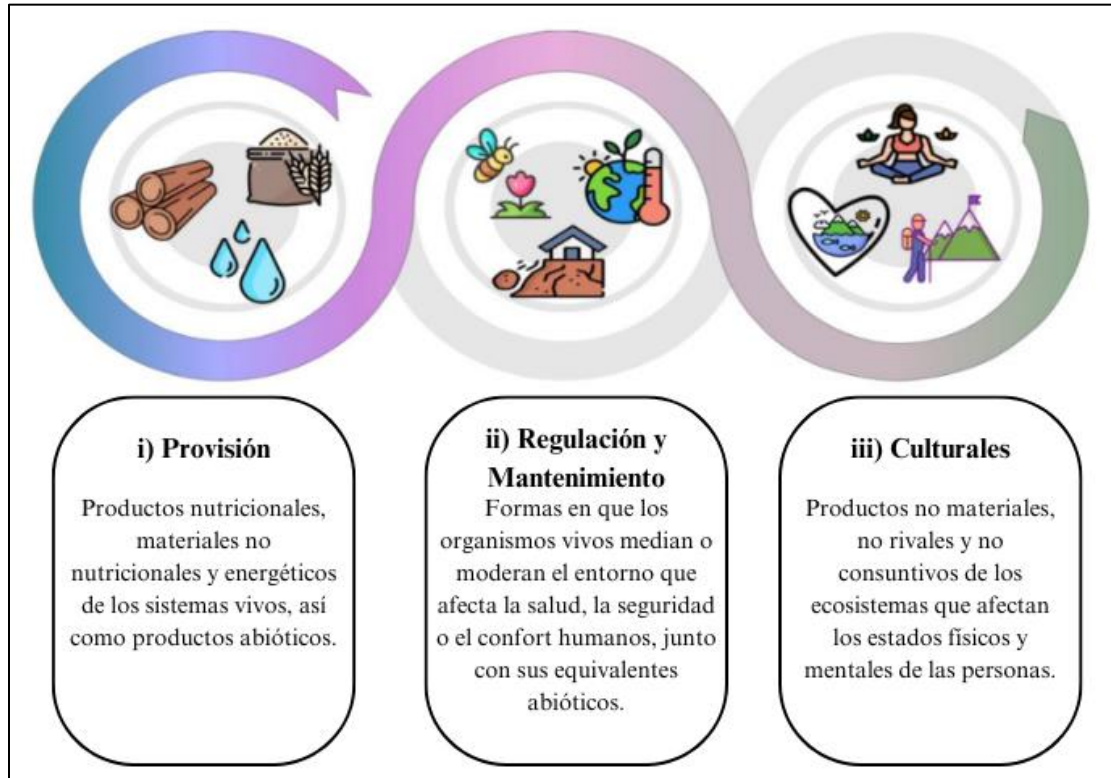
4.2.1. Definición de los Servicios Ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos (SE), según el documento CICES versión 5.1 de Haines-Young and Potschin (2018), se definen como las contribuciones de los ecosistemas al bienestar humano. Esta definición enfatiza que los SE son resultado de funciones y procesos propios de los ecosistemas, o, en palabras simples, son “lo que los ecosistemas hacen” para las personas. Respecto a lo anterior, se tiene que cada uno se vincula a características específicas de los distintos ecosistemas, posibilitando su provisión, por ejemplo: la biodiversidad, la calidad del suelo y del agua, e inclusive las interacciones entre organismos.

La clasificación de los SE, presentada en la Figura N°4, se organiza de tal manera que permite facilitar la identificación y comparación entre cada uno, dividiéndose en tres grandes categorías; (i) Provisión, (ii) Regulación y Mantenimiento y (iii) Culturales (Haines-Young, 2023).

Figura 4.

Servicios ecosistémicos de acuerdo con la clasificación CICES v5.1.



Fuente: Haines-Young and Potschin (2018); (Martínez-Martínez et al., 2023); Martínez (2023).

4.2.2. Impactos del desarrollo eólico en los servicios ecosistémicos

La generación de energía eólica, a pesar de ser reconocida por potenciar la descarbonización de la matriz energética, tiene la capacidad de afectar los SE de diversas maneras. Un ejemplo de esto es la transformación del paisaje y los cambios en el uso de suelo que son producidos por la instalación de parque eólicos, pudiendo afectar servicios como el de provisión de recursos naturales y la regulación de procesos ambientales.

Martínez et al. (2023) señala que la instalación de parques eólicos impacta considerablemente varios indicadores que se asocian a los SE. Por ejemplo, entre los impactos que evalúa, se estima que el aprovisionamiento de cultivos agrícolas se reduce hasta en un 10%, debido al desarrollo eólico.

Los cambios o alteraciones en los servicios ecosistémicos muestran la importancia y necesidad de realizar una evaluación de los efectos del desarrollo energético eólico, para poder equilibrar los beneficios energéticos y ecosistémicos. En la Tabla N°1 se muestra una revisión bibliográfica con los potenciales impactos del desarrollo eólico sobre los servicios ecosistémicos.

Tabla 1.

Potenciales impactos sobre servicios ecosistémicos.

| Área de estudio | Servicio ecosistémico | Resultados | Referencias |
|------------------------------|---|--|----------------------------------|
| Regiones del Ñuble y Biobío. | Provisión de recursos). | La instalación de parques eólicos puede afectar la disponibilidad de recursos como el agua y productos agrícolas. | Martínez-Martínez et al. (2022). |
| | Regulación y mantenimiento (regulación del clima y la erosión). | Las turbinas eólicas pueden alterar las condiciones de temperatura (las cuales aumentan levemente) y humedad. Además, los disturbios en el suelo aumentan la erosión, y la capacidad del suelo para retener agua y nutrientes. | |
| | Culturales (valor estético y paisajístico). | Los parques eólicos pueden tener un impacto visual significativo, reduciendo el valor estético de los paisajes naturales. | |
| Regiones del Ñuble y Biobío. | Provisión (producción agrícola y de madera). | La transformación de tierras agrícolas para la instalación de infraestructura eólica puede reducir la producción de cultivos y madera en un 10%, este último afectando a bosques nativos y plantaciones exóticas. | Martínez-Martínez et al. (2023). |
| | Regulación y mantenimiento (regulación de la erosión y calidad del agua). | La infraestructura eólica puede incrementar la erosión del suelo entre un 40% - 50% producto de la remoción de la vegetal. Por otro lado, los servicios relacionados con el ahorro de agua aumentaron un 10%. | |

Fuente: Martínez-Martínez et al. (2022); Martínez-Martínez et al. (2023).

4.3. Rendimiento hídrico

4.3.1. Concepto de rendimiento hídrico y factores que lo afectan

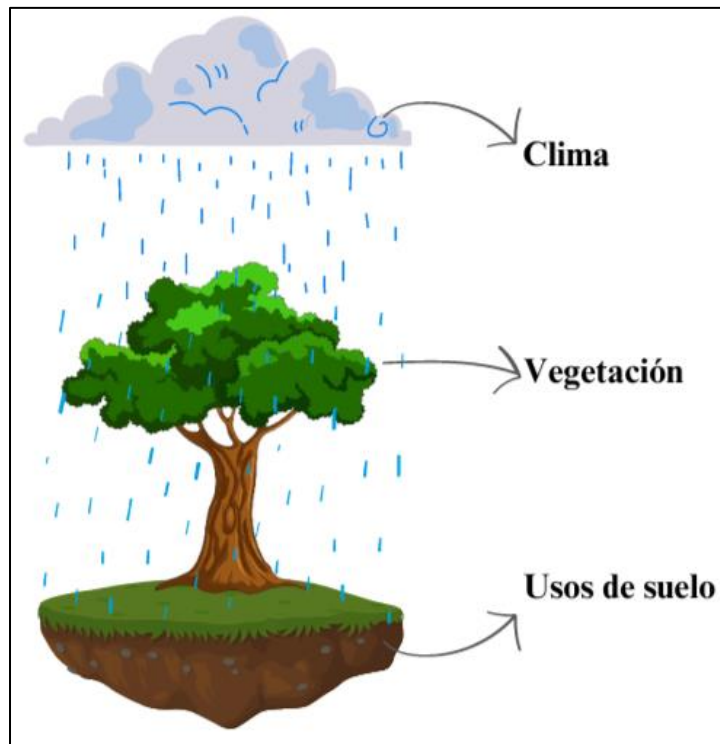
El rendimiento hídrico corresponde a la cantidad de agua que una cuenca hidrográfica genera y pone a disposición de forma anual, determinada por las condiciones climáticas y biofísicas del

territorio (Natural Capital Project, 2024). Su análisis espacial permite identificar las zonas con mayor o menor capacidad de generación de agua, considerando la precipitación y las pérdidas asociadas a la evapotranspiración, junto con la influencia del uso y las características del suelo (Carrasco-Valencia et al., 2024). En este sentido, constituye un indicador clave para evaluar la disponibilidad hídrica y comprender el aporte de agua como servicio ecosistémico.

La capacidad de los ecosistemas para retener y regular la cantidad de agua se encuentra fuertemente vinculada a los servicios ecosistémicos de regulación y mantenimiento, lo cual es sumamente crucial para lograr un equilibrio en los ciclos hidrológicos y suministro de agua, tanto para uso humano como ecosistémico. En contexto de las energías renovables, este proceso adquiere especial relevancia, pues muchas veces la implementación de proyectos eólicos requiere un despeje de vegetación importante, logrando una transformación del territorio en que su capacidad para infiltrar el agua puede verse alterada (Carrasco-Valencia et al., 2024). En la Figura N°5 se presenta un diagrama sobre los factores que afectan al rendimiento hídrico (Gondor et al., 2014):

Figura 5.

Factores que afectan al rendimiento hídrico (simplificado).



Fuente: Adaptado de Gondor et al. (2014).

El rendimiento hídrico puede ser influenciado por distintos factores, destacándose la precipitación, las características y usos del suelo. Estos elementos determinan la capacidad de infiltrar y almacenar agua, influyendo directamente en su disponibilidad. Un claro ejemplo de esto es el estudio realizado por Carrasco-Valencia et al. (2024), en el que se evaluó el rendimiento hídrico en la cuenca del río Chili, en Arequipa, en función de los cambios de uso de suelo. Este estudio evidencia que el rendimiento hídrico, manifestado en forma de escorrentía superficial, incrementa con la remoción de la cubierta vegetal, debiéndose a que las plantas absorben agua del suelo y la liberan a la atmósfera. Aquellas zonas con mayor cobertura vegetal tienden a favorecer el proceso de infiltración de agua al suelo, por lo que el rendimiento hídrico en estas zonas sería menor. En contra parte, la deforestación, la expansión de áreas agrícolas y las infraestructuras antrópicas disminuyen la capacidad del suelo para retener el agua, afectando negativamente la capacidad de los ecosistemas para regular este ciclo, pues el agua queda disponible en forma de escorrentía superficial (Carrasco-Valencia et al., 2024; Geng et al., 2014). En la Tabla N°2 se presentan los posibles impactos en el rendimiento hídrico obtenidos por algunos estudios.

Tabla 2.

Impactos sobre el rendimiento hídrico en distintas áreas de estudio.

| Área de estudio | Impulsor de cambio | Rendimiento hídrico | Resultados sobre el rendimiento hídrico | | Referencia |
|----------------------------|--------------------|---|---|---|----------------------------------|
| | | | Escenario base | Escenario evaluado | |
| Río Chile, Arequipa, Perú. | Expansión urbana. | La expansión urbana reduce la infiltración del agua, aumenta el escurrimiento superficial e impacta negativamente la cantidad y calidad hídrica. | Año 1984: 1.74 × 10 ⁶ m ³ /km ² . | Año 2022: 1.32 × 10 ⁶ m ³ /km ² . | Carrasco-Valencia et al. (2024). |
| Montañas Wuyi, China. | Expansión urbana. | La deforestación reduce infiltración, causando escasez y contaminación. Conservar bosques mejora infiltración, reduce escorrentía y mejora la calidad del agua. | Año 2000: 4.933 × 10 ¹¹ m ³ /km ² . | Año 2020: 4.997 × 10 ¹¹ m ³ /km ² . | Chen et al. (2024). |

| Área de estudio | Impulsor de cambio | Rendimiento hídrico | Resultados sobre el rendimiento hídrico | | Referencia |
|-----------------|--------------------|---------------------|---|--------------------|------------|
| | | | Escenario base | Escenario evaluado | |
| | | | Cuenca del río Heihe, China. | Expansión urbana. | |

Fuente: Carrasco-Valencia et al. (2024); Chen et al. (2024); Geng et al. (2014).

4.3.2. Interacción entre el rendimiento hídrico y la energía eólica

La generación de energía eólica puede afectar a los servicios ecosistémicos relacionados con la regulación de ciclo hidrológico, especialmente el rendimiento hídrico. A medida que se producen cambios el uso del suelo como despeje de vegetación y urbanización para la instalación de parque eólicos, se alteran procesos naturales que regulan el agua, lo que puede tener consecuencias importantes para el rendimiento hídrico total (Carrasco-Valencia et al., 2024). Además, puede crear superficies impermeables que pueden afectar la recarga de acuíferos en el largo plazo, debido a la disminución de infiltración.

En el contexto nacional, en la región del Ñuble un 64.9% de las áreas adecuadas para el desarrollo eólico son tierras agrícolas, mientras que Biobío destaca por tener una mayor proporción de plantaciones forestales exóticas, alcanzando el 68.9% (Martínez-Martínez et al., 2023). Considerando estas cifras, y cómo los cambios en los usos de suelo afectan el rendimiento hídrico local, es probable que cualquier intervención para desarrollar infraestructura eólica (como la alteración de prácticas agrícolas o la reducción de áreas de cultivo) implique cambios en el uso de suelo. Sin embargo, la relación directa entre estos cambios y el rendimiento hídrico debido a la instalación de parques eólicos no ha sido suficientemente estudiada. A raíz de lo anterior, no se sabe con certeza la magnitud del impacto.

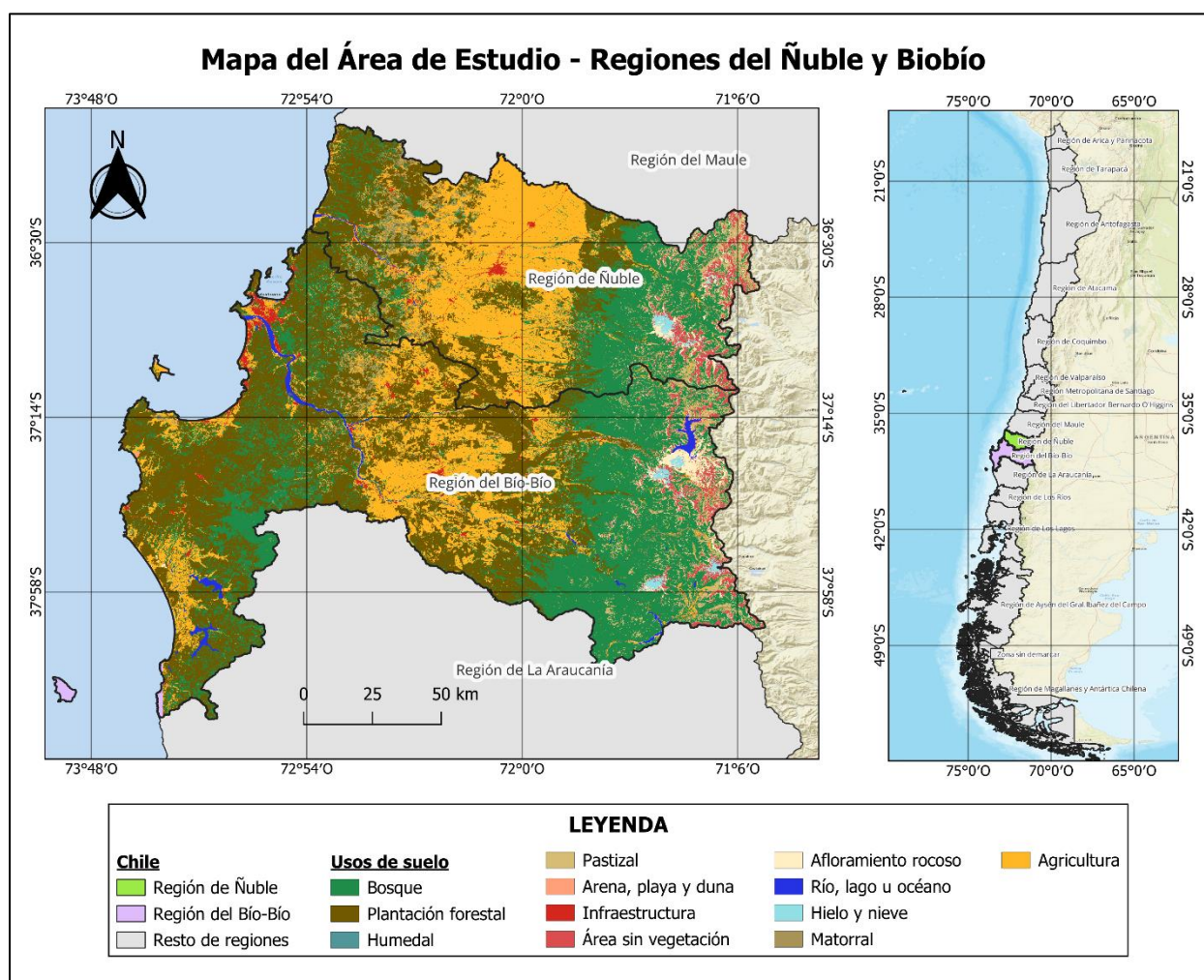
5. METODOLOGÍA

5.1. Área de estudio

El área de estudio para esta investigación se emplaza en las regiones del Biobío y Ñuble, ambas ubicadas en la zona centro-sur de Chile, siendo representadas por la Figura N°6. La Región del Biobío se ubica específicamente entre los 36°26' y los 38°29' de latitud sur, limitando al norte con la Región de Ñuble, esta última localizándose entre los 36°00' y los 37°12' de latitud sur (BCN, 2024). Estas regiones fueron identificadas como zonas con alto potencial energético renovable (Martínez-Martínez et al., 2023).

Figura 6.

Regiones del Biobío y Ñuble con sus respectivos usos de suelo.



Fuente: MapBiomass Chile (2024)

La región del Biobío fue la tercera región con mayor potencial eólico según el Ministerio de Energía, mientras que la región del Ñuble ocupa el sexto lugar. Se espera que el desarrollo de las zonas con potencial eólico en el área de estudio contribuya a la matriz renovable nacional para lograr los compromisos de descarbonización. En relación con esto, políticas como el PELP, que apuntan hacia la carbono neutralidad, señalan que el desarrollo de la energía eólica aumente exponencialmente en los próximos años, esperándose que los proyectos asociados a centrales eólicas aumenten en las zonas con potencial energético. (Martínez-Martínez et al., 2023; Ministerio de Energía, 2021b).

El área de estudio son las regiones del Ñuble y Biobío, siendo esta última la tercera región con mayor potencial eólico según el Ministerio de Energía, mientras que la región del Ñuble ocupa el sexto lugar. Se espera que el desarrollo de las zonas con potencial eólico en el área de estudio contribuya a la matriz renovable nacional para lograr los compromisos de descarbonización.

5.2. Escenarios de desarrollo energético eólico

5.2.1. Potencial eólico en el área de estudio

El potencial eólico, expresado en megavatios (MW), representa la cantidad de energía que puede ser técnicamente aprovechada a partir del recurso viento en un territorio (Chang, 2011). A partir de esto, el análisis realizado tiene como objetivo identificar de forma espacial dicha potencia en el área de estudio, mediante la elaboración de un mapa que permita visualizar dónde y cuánta energía se puede generar. Para ello, la estimación considera un conjunto de criterios de exclusión agrupados en tres categorías: restricciones técnicas (como el factor de planta), restricciones ambientales (como la proximidad a glaciares o cuerpos de agua) y restricciones territoriales (como las zonas definidas por instrumentos de ordenamiento territorial), conocidas en conjunto como restricciones TAT, lo que permite delimitar zonas aptas para el desarrollo eólico.

La elaboración de la capa geoespacial de potencial eólico se basó en la metodología empleada por el Ministerio de Energía (2014), donde se realizó un análisis georreferenciado en Chile desde Arica hasta Chiloé. La evaluación de la disponibilidad del recurso eólico en el área de estudio se realiza considerando restricciones TAT, cuya información se presenta en la Tabla N°3.

Uno de los factores clave para identificar y restringir aquellas zonas con potencial eólico es el factor de planta (FP), que se define como la proporción de energía que una instalación puede generar durante un año, en relación con su capacidad máxima teórica, cuyo valor dependerá tanto de la disponibilidad del recurso, como de la eficiencia de la tecnología (Schallenberg Rodríguez et al., 2008). Para obtener el FP, se emplearon datos correspondientes a la tecnología

eólica Vestas V117-3300kW a 100 m (datos WRF 2015), considerando un factor de eficiencia del 75% y una resolución espacial de 1 km. Esta elección se fundamenta tanto en la disponibilidad de información como, principalmente, en la prevalencia de proyectos implementados en el área de estudio, los cuales se detallan en el Anexo N°1. Se estableció un umbral del 22% para el FP, descartando aquellas zonas cuyo valor fuera inferior. Esta decisión se fundamentó en un análisis por cuartiles de la cartera de proyectos eólicos en Chile, en el cual se observó que al menos el 75% de los proyectos considerados presentan un FP igual o superior al umbral. Esta distribución se puede visualizar con mayor detalle en el gráfico incluido en el Anexo N°2.

Tabla 3.

Factores TAT aplicados para la obtención de potencial eólico.

| Factores técnicos | | | |
|--|----------------------------|----------------|---|
| Factor | Umbral de exclusión | Formato | Fuente |
| Factor de planta | < 22% | Ráster | Ministerio de Energía (2018) |
| Pendiente | > 15° | Ráster | U.S. Geological Survey (2012) |
| Altitud | > 3000 m.s.n.m | Ráster | U.S. Geological Survey (2012) |
| Factores ambientales | | | |
| SNASPE | Exclusión por presencia | Vector | CONAF (2019) |
| Inventario de cuerpos de agua | Zonas hasta 300 m | Vector | BCN (2018) |
| Inventario de glaciares | Zonas hasta 300 m | Vector | DGA (2024) |
| Factores territoriales | | | |
| Límite de instrumentos de O. territorial | 1000 m | Vector | Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2021) |
| Red hidrográfica | 300 m | Vector | BCN (2018) |
| Red vial | Zonas hasta 60 m | Vector | BCN (2018) |

Fuente: Ministerio de Energía (2014)

Una vez obtenidos los factores TAT y aplicados sus respectivos umbrales de exclusión, se realizó una conversión de los archivos vectoriales a formato ráster, con una resolución espacial de 100 metros. Posteriormente, cada uno de los ráster generados fue reclasificado en una capa binaria, asignando el valor de 0 a las zonas excluidas y de 1 a las zonas con potencial eólico, todo esto preconfigurado según el factor de planta (<22%). Luego, se cortaron las capas al área de estudio y se combinaron mediante la calculadora ráster de QGIS, lo que dio como resultado las zonas con potencial eólico dentro del área de estudio.

Tras delimitar las zonas con potencial eólico en formato ráster, el archivo fue convertido a formato vectorial y se determinó la superficie de cada polígono en hectáreas. Una vez realizado lo anterior, se estimó el potencial eólico de cada polígono mediante la expresión:

$$P = \frac{A}{\delta_p} \quad (1)$$

, donde A es el área del polígono [ha] y δ_p corresponde a la densidad de potencia [ha/MW]. La densidad de potencia se define como la superficie necesaria para instalar 1 MW de potencia (Ministerio de Energía, 2014) y se estableció como 30 ha/MW, siendo un valor conservador que se relaciona con una alta densidad de viviendas, con la finalidad de asegurar mayores distancias entre aerogeneradores y minimizar los conflictos territoriales.

5.2.2. Elaboración de escenarios

Para evaluar el impacto del desarrollo energético eólico sobre el rendimiento hídrico, es necesario conocer el panorama general de la implementación de los proyectos eólicos. La definición de los escenarios se basa en la premisa de que los cambios en los usos de suelo son el principal factor de análisis (Carrasco-Valencia et al., 2024). A partir de esto, la Tabla N°4 presenta la definición de los escenarios:

Tabla 4.

Definición de escenarios.

| Escenario | Definición |
|-----------|--|
| Base | Corresponde a aquellas zonas que actualmente no se dedican a la generación eólica, pero que presentan un alto potencial para la implementación de esta energía en el futuro, representando las condiciones actuales del rendimiento hídrico y sus usos actuales del suelo. Este escenario permite tener una referencia para la estimación de los posibles impactos en la expansión de la energía eólica. |
| Futuro | Este escenario representa la proyección del escenario energético eólico base, el cual contempla la plena explotación de las áreas potenciales para la implementación de nuevos proyectos de generación de energía eólica, los cuales pueden coexistir el uso de suelo agrícola (Greßhake et al., 2025). |

Una vez establecidos los escenarios base y futuro con sus respectivos rendimientos hídricos, el cambio se estimó como la resta entre ambos casos, con la finalidad de identificar la magnitud y dirección de los cambios atribuibles a la expansión eólica. Los posibles resultados de esta

operación se sintetizan en la Tabla N°5, la cual detalla la variación del rendimiento hídrico en las áreas con potencial eólico.

Tabla 5.

Categorización de la variación del rendimiento hídrico entre los escenarios Base y Futuro.

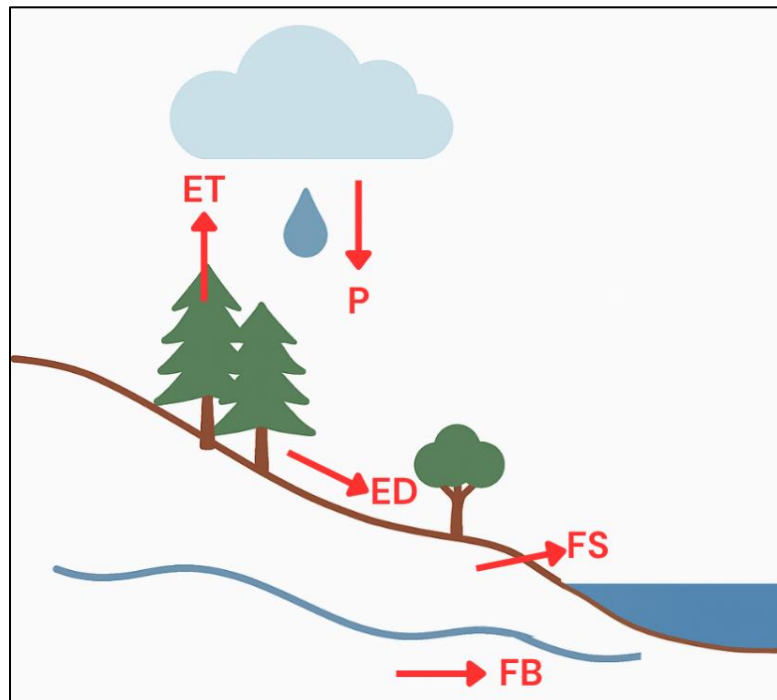
| ΔWY | Relación escenarios | WY Futuro |
|-------------|---------------------|-------------|
| + | Base > Futuro | Disminución |
| 0 | Base = Futuro | Sin cambio |
| - | Base < Futuro | Aumento |

5.3. Rendimiento hídrico anual de InVEST

La estimación del rendimiento hídrico se realizó mediante un modelo hidrológico que convierte la información climática (como la precipitación) y territorial (como los usos de suelo) en datos de rendimiento hídrico en forma de caudal, integrando parámetros representativos del funcionamiento hidrológico de la cuenca. En este estudio, se utilizó el modelo hidrológico “Rendimiento Hídrico Anual” incluido en el software InVEST, desarrollado por Natural Capital Project (2024).

Figura 7.

Balance hídrico a escala de cuenca.



Este modelo es una representación del balance hídrico propuesto por Budyko (1974), representado por la Figura N°7. A partir de esto, se tiene que el concepto de balance hídrico resulta útil para evaluar la respuesta hidrológica de una cuenca en condiciones cambiantes de uso del suelo (Zhang et al., 2004). El balance hídrico puede ser descrito como:

$$P - ET - ED - FS - FB = \Delta S \quad (2)$$

, donde P es la precipitación (principal entrada del balance), ET es evapotranspiración, ED es la escorrentía directa, FS es el flujo subsuperficial, FB es el flujo base y ΔS corresponde al cambio en el almacenamiento de agua en la cuenca. Cuando se utilizan promedios de un periodo prolongado, el cambio en el almacenamiento (ΔS) puede ser despreciado. Adicionalmente, el modelo reordena el balance hídrico en función de la escorrentía (R), que agrupa los términos de ED, FS y FB en una única variable, teniendo como resultado:

$$P - ET - R = 0 \quad (3)$$

A partir de la ecuación (2), que es una simplificación del balance hídrico, se tiene que:

$$R = P - ET \quad (4)$$

Por otro lado, la Tabla N°6 presenta los principales supuestos del modelo de rendimiento hídrico.

Tabla 6.

Supuestos del modelo de rendimiento hídrico anual de InVEST.

| Supuesto | Fuente |
|--|--|
| No se consideran las interacciones de las aguas superficiales y subterráneas | Natural Capital Project (2024) |
| El cambio en el almacenamiento (ΔS) puede despreciarse, ya que, al promediarse en escalas de tiempo prolongadas, su influencia resulta insignificante en el balance hídrico | Budyko M.I (1974); Zhang et al. (2004) |
| El modelo no diferencia entre la escorrentía directa (ED), flujo subsuperficial (FS) y el flujo base (FB), sino que asume que toda la producción de agua de un píxel llega al punto de interés a través de una de estas vías | Natural Capital Project (2024) |

El modelo utiliza la siguiente ecuación para estimar el rendimiento hídrico en cada píxel del territorio (Natural Capital Project, 2024):

$$Y(x) = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right) \times P(x) \quad (5)$$

, donde $Y(x)$ es el rendimiento hídrico para un píxel, $AET(x)$ corresponde a la evapotranspiración real anual para un píxel x , y $P(x)$ es la precipitación anual en el píxel x , las tres variables se expresan en mm/año. Particularmente, el término $\frac{AET(x)}{P(x)}$, corresponde al índice de evaporación estipulado en la curva de Budyko, el cual representa la relación de largo plazo entre la evapotranspiración real (AET) y la precipitación (P) para un píxel x , en función del balance entre oferta de agua (precipitación) y demanda atmosférica o evapotranspiración potencial (PET) (Budyko, 1974; Fuh, 1981; Zhang et al., 2004) . A partir de esto, el índice de evaporación en el modelo de AWY se estima de la siguiente forma:

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left[1 + \left(\frac{PET(x)}{P(x)}\right)^\omega\right]^{\left(\frac{1}{\omega}\right)} \quad (6)$$

donde $PET(x)$ corresponde la evapotranspiración potencial para un píxel x , expresada en mm/año, y está definida por:

$$PET(x) = Kc(l_x) \times ET_o(x) \quad (7)$$

donde $ET_o(x)$ es la evapotranspiración de referencia para un píxel x , expresada en mm/año; y Kc es el coeficiente de evapotranspiración de la vegetación asociado a cada tipo de uso de suelo para un píxel x .

Por otro lado, el parámetro ω representa los efectos integrados de las características de la cuenca (como la cobertura vegetal, las propiedades del suelo, el clima y la topografía) en el balance hídrico (Zhang et al., 2004). Este parámetro se estima como:

$$\omega(x) = Z \times \frac{AWC(x)}{P(x)} + 1,25 \quad (8)$$

, donde $AWC(x)$ corresponde a la cantidad volumétrica de agua disponible para las plantas en un píxel x , expresada en milímetros; y el parámetro Z es un número adimensional que representa las características de la cuenca relacionadas a la estacionalidad climática, la intensidad de las precipitaciones y la topografía (Hamel & Guswa, 2015).

5.4. Datos de entrada al modelo de rendimiento hídrico anual

El modelo se basa en los principios del balance hídrico, utilizando una representación conceptual del ciclo hidrológico en función de la oferta y demanda de agua, integrando parámetros climáticos, biofísicos y territoriales propuesto por Zhang et al. (2004). Para calcular el rendimiento hídrico anual, el modelo requiere una serie de datos de entrada que permitan caracterizar adecuadamente las condiciones de cada píxel del área de estudio. En la Figura N°8 se presentan las entradas y salidas del modelo. Por otro lado, la Tabla N°7 muestra los datos correspondientes a dichas variables de entrada, junto con sus respectivas fuentes de información.

Figura 8.

Datos de entradas al modelo de rendimiento hídrico de InVEST.

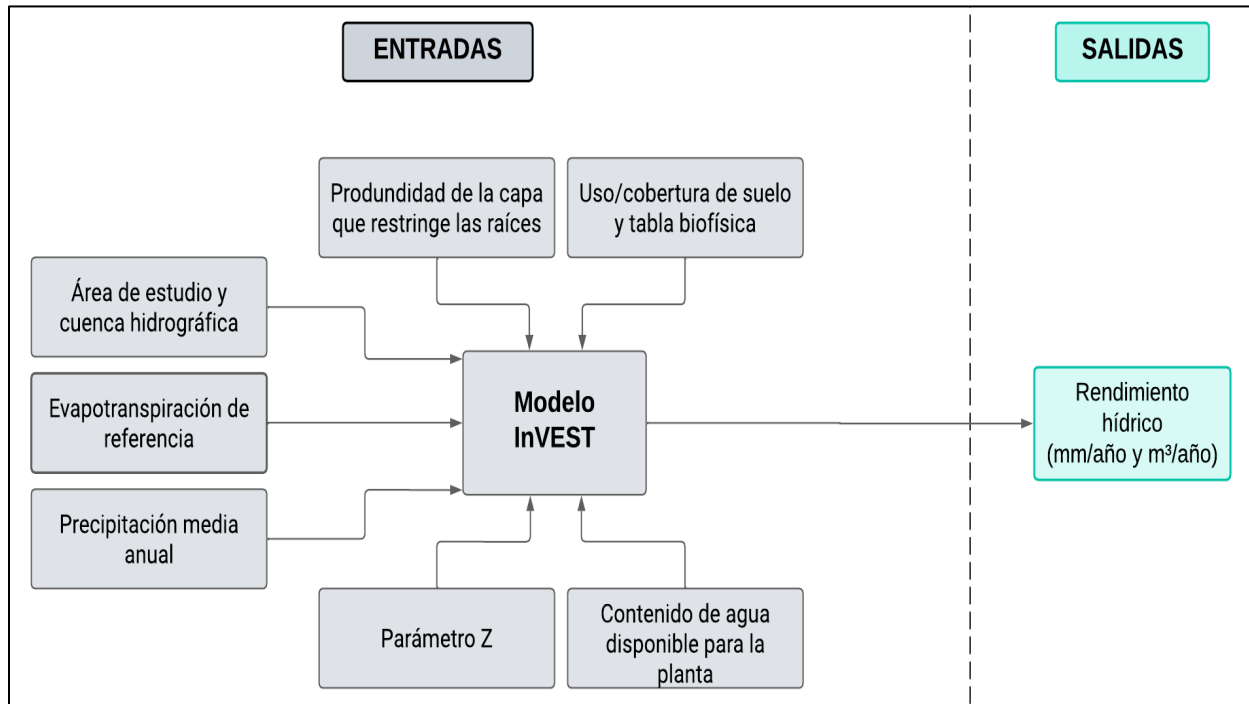


Tabla 7.

Fuentes de datos para parámetros de entrada del modelo.

| Parámetro | Formato | Unidad de medida | Fuente |
|---|---------|------------------|---|
| Precipitación media anual | Ráster | mm/año | Boisier (2023) |
| Evapotranspiración de referencia (ET _o) | Ráster | mm/año | Allan et al. (1998); Boisier (2023); Fick and Hijmans (2017) |

| Parámetro | Formato | Unidad de medida | Fuente |
|---|------------------|------------------|---|
| Uso/cobertura del suelo | Ráster | - | MapBiomass Chile (2024) |
| Profundidad de la capa que restringe a las raíces | Ráster | mm | Hengl et al. (2017) |
| Contenido de agua disponible para la planta | Ráster | - | |
| Tabla biofísica | Archivo de texto | - | Allan et al. (1998) |
| Parámetro Z | Número | - | Dirección General de Aeronáutica Civil (2024) |
| Cuencas y subcuencas | Vector | - | DGA (2024) |

5.4.1. Manejo de datos para el modelo de rendimiento hídrico anual

Con el fin de estimar el rendimiento hídrico anual mediante el modelo de InVEST, fue necesario recopilar y procesar una serie de datos climáticos, edáficos y biofísicos representativos del área de estudio. Para garantizar robustez de los resultados, se definió un periodo de análisis de 10 años (2012-2021), lo cual es el mínimo recomendado por (Natural Capital Project, 2024), pues permite integrar de la variabilidad interanual, con la finalidad de reducir anomalías y sesgos de años extremos, como años con abundante precipitación o años de extrema sequía. La Tabla N°8 resume los parámetros requeridos, indicando para cada uno su temporalidad, resolución espacial utilizada y observaciones relevantes respecto a su obtención o tratamiento.

Tabla 8.

Parámetros de entrada, temporalidad y resolución espacial para el modelo AWY.

| Parámetro | Temporalidad | Resolución | Observación |
|----------------------------------|--------------|------------|---|
| Precipitación media anual | 2012-2021 | 100 metros | Se requiere la precipitación media anual del periodo de estudio |
| Evapotranspiración de referencia | 2012-2021 | 100 metros | Se requirieron datos de radiación extraterrestre, temperatura y precipitación |
| Uso/cobertura del suelo | 2012-2021 | 100 metros | Se utilizó el valor más frecuente por píxel (moda) |

| Parámetro | Temporalidad | Resolución | Observación |
|---|--------------|------------|---|
| Profundidad de la capa que restringe las raíces | 2017 | 100 metros | No se requirió pretratamiento para esta variable |
| Contenido de agua disponible para la planta | 2017 | 10 metros | Para su obtención, se aplicó una regla trapezoidal |
| Tabla biofísica | n.a | n.a | Particularmente para la estimación de Kc y profundidad de raíz, se utilizaron los cultivos más presentes por uso de suelo |
| Parámetro Z | n.a | n.a | Para su estimación se utilizaron precipitaciones instantáneas |
| Cuencas y subcuencas | n.a | n.a | No se requirió pretratamiento para esta variable |

*n.a: No aplica

5.4.2. Precipitación media anual

Para la elaboración de la capa ráster de precipitación se utilizaron datos del conjunto CR2MET (Boisier, 2023), que se encuentran con una resolución de 0.05° y es de cobertura nacional. El procesamiento de la información se realizó en QGIS. En primer lugar, se recortó al área de estudio, luego se sumó la precipitación diaria para obtenerla a escala mensual y luego a escala anual. Finalmente, se calculó la precipitación media anual como promedio de los diez años (ver Anexo N°3 para más detalles).

5.4.3. Evapotranspiración de referencia

Para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o), se utilizó la ecuación de Hargreaves modificada (Droogers & Allen, 2002):

$$ET_o = 0,0013 \times 0.408 \times RA \times (T_{av} + 17) \times (TD - 0,0123 \times P)^{0,76} \quad (9)$$

, donde RA representa la radiación extraterrestre, expresada en MJ/ m²d; T_{av} corresponde al promedio mensual de las temperaturas máximas y mínimas diarias, en °C; TD es la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas medias diarias de cada mes, también en °C; y P indica la precipitación media mensual, expresada en mm/mes.

A continuación, la Tabla N°9 resume los parámetros a utilizar para la estimación de la ET_o. Para mayor detalle ver Anexo N°3.

Tabla 9.

Parámetros para estimación de la ETo.

| Parámetro | Fuente de datos | Unidad | Procesamiento |
|-------------------------------|---|------------------------|---|
| Temperatura | Boisier (2023) | °C | Promedio mensual a partir de datos diarios. Periodo 2012-2021 |
| Precipitación | Boisier (2023) | mm/mes | Promedio mensual a partir de datos diarios del periodo 2012-2021 |
| Radiación extraterrestre (RA) | Allen et al. (1998); Fick and Hijmans (2017) | MJ/m ² /día | Estimación de RA a partir de radiación solar, número de horas de sol y coeficientes as y bs |

5.4.4. Uso/cobertura del suelo (LULC)

La capa ráster de usos de suelo se obtuvo de MapBiomás Chile (2024), que son mapas elaborados a partir de imágenes satelitales Landsat procesadas en Google Earth Engine. Para el escenario base, se utilizaron datos anuales entre los años 2012 y 2021, aplicando la moda de cada ráster, con la finalidad de identificar el uso de suelo más frecuente por píxel (ver Anexo N°3 para más detalles). Por otro lado, para obtener los usos de suelo del escenario futuro, las áreas con potencial eólico se reclasificaron íntegramente como suelo agrícola, al considerarse como el uso de suelo más compatible con el desarrollo eólico al coexistir con este (Martínez-Martínez et al., 2023).

5.4.5. Profundidad de la capa que restringe a las raíces

Los datos para la elaboración de la capa de profundidad de restricción radicular fueron extraídos del ISRIC, particularmente del conjunto de datos SoilGrids 250m (versión 2017) “Profundidad hasta el lecho rocoso (horizonte R)”. Este conjunto de datos ráster posee una cobertura espacial a nivel global y expresa la profundidad en centímetros Hengl et al. (2017).

Para su adecuación al análisis, se realizó la conversión de unidades (centímetros a milímetros) mediante la calculadora ráster de QGIS, para posteriormente delimitar el ráster resultante al área de estudio con una resolución de 100 metros.

5.4.6. Contenido de agua disponible para la planta (PAWC)

Se utilizaron datos globales de SoilGrids 20m “Capacidad de agua disponible en el suelo derivada (fracción volumétrica) hasta el punto de marchitamiento” (Hengl et al., 2017)”. Este conjunto de datos entrega valores del contenido volumétrico de agua disponible en la planta (o AWC, por sus siglas en inglés) en porcentaje para siete profundidades del suelo. Para su uso en el modelo de

InVEST, se generó una única capa combinada mediante una media ponderada utilizando la regla trapezoidal de integración numérica (ver Anexo N°3 para más detalles). Posteriormente, los valores fueron convertidos desde porcentajes hacia fracciones (con valores en el rango de 0 a 1) en QGIS, ajustando la capa resultante al área de estudio.

5.4.7. Tabla biofísica

Corresponde a un archivo de texto que contiene parámetros biofísicos asociados a cada uso y cobertura de suelo. Todos los valores del ráster de LULC deben tener un registro en este archivo, para esto se cuenta con distintas columnas, detallados en la Tabla N°10 y en el Anexo N°3.

Tabla 10.

Contenidos de la tabla biofísica.

| Columna | Descripción |
|----------------|--|
| lucode | Identificador para cada uso de suelo |
| lulc_veg | Indica la presencia de vegetación (valor 1) o la presencia de otras clases como humedales y zonas urbanas (valor 0). |
| Root_depth | Profundidad máxima de raíces (en milímetros) para las clases de uso de suelo con cobertura vegetal (lulc_veg=1). Para las columnas con lulc_veg=0, se asignó un valor de -1. |
| Kc | Coefficiente de cultivo (Kc) adimensional. |

Fuente: Natural Capital Project (2024)

5.4.8. Parámetro Z

La estimación del parámetro Z se realizó utilizando la ecuación:

$$Z = 0.2 * N \quad (10)$$

, donde N es el número de eventos de lluvia por año. De acuerdo con Donohue et al. (2012), un evento se caracteriza por un periodo mínimo de 6 horas entre dos tormentas y con una profundidad mínima del evento de 0.1 mm; este umbral descarta precipitaciones insignificantes o en forma de trazas (Camuffo et al., 2021; Dunkerley, 2008).

Se descargaron los datos de precipitación instantánea disponibles en la Dirección General de Aeronáutica Civil (2024) y la selección de las estaciones meteorológicas (distribuidas espacialmente a lo largo y ancho del territorio) se basó en la disponibilidad de datos, detallándose en la Tabla N°11. A partir de los registros horario de precipitación, se aplicaron los umbrales establecidos para delimitar cada evento de lluvia, obteniendo un valor de Z=15.

Tabla 11.

Estaciones meteorológicas utilizadas en la estimación de N.

| Región | Estación | Sector | Años disponibles |
|--------|---------------------|----------------------|------------------|
| Ñuble | Ninhue | Costa | 2012, 2016, 2021 |
| | Sta. Rosa | Depresión intermedia | 2012, 2016, 2021 |
| | Chillán Mayulermo | Cordillera | 2021 |
| Biobío | Cañete | Costa | 2012, 2016, 2021 |
| | Los Ángeles – Human | Depresión intermedia | 2012, 2016, 2021 |
| | I.N.I.A. | | |

Fuente: Dirección General de Aeronáutica Civil (2024)

5.4.9. División de cuencas y subcuencas

Las delimitaciones de cuencas y subcuencas se obtuvieron del repositorio de datos espaciales de la Dirección General de Aguas (DGA, 2024) que contiene una cartografía nacional de las unidades hidrográficas de Chile. El único preprocesamiento realizado fue recortarlas al límite del área de estudio.

5.5. Índice hidroenergético

El índice hidroenergético (HEI) se define como la relación entre el rendimiento hídrico anual (WY en mm/año) y el potencial eólico disponible (MW). Este índice permite identificar espacialmente la cantidad de agua disponible por cada MW de potencial eólico, y se estima utilizando la siguiente ecuación:

$$HEI = \frac{\text{Rendimiento hídrico}}{\text{Potencial eólico}} \quad (11)$$

, cuyo rendimiento hídrico es expresado en mm/año y el potencial eólico en MW.

El HEI, representado en la Tabla N°12, evidencia espacialmente los trade-off entre la generación eólica y el rendimiento hídrico, mostrando que el aumento de uno de los implica la reducción del otro.

Tabla 12.

Interpretación del índice hidroenergético (HEI).

| HEI Futuro | Significado hidroenergético | Trade-off |
|------------|------------------------------|-----------|
| HEI bajo | Menos agua disponible por MW | Bajo |
| HEI alto | Más agua disponible por MW | Alto |

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Potencial eólico en el área de estudio

Los resultados obtenidos en la estimación del potencial eólico demuestran una alta variabilidad espacial entre las regiones de Ñuble y Biobío. En términos regionales, Ñuble presenta un potencial de 5306 MW, abarcando aproximadamente 159175 hectáreas. Por otro lado, la región del Biobío cuenta con un potencial eólico al menos tres veces superior a la región del Ñuble, estimado en 18022 MW sobre una superficie utilizable de 540665 hectáreas. Este contraste refleja una mayor extensión territorial apta para la generación eólica en la región del Biobío, lo que puede ser traducido como un mayor aprovechamiento teórico del recurso viento.

En el ámbito provincial (ver Tabla N°13), se observa que la región del Ñuble presenta un potencial eólico que va desde los 1629 MW en la provincia de Punilla hasta los 2006 MW en la provincia de Diguillín. En contraste, la región del Biobío cuenta con valores que fluctúan desde un mínimo de 561 MW en la provincia de Concepción, hasta un máximo cercano a los 11582 MW la provincia del Biobío.

Según la Figura N°9, la distribución del potencial eólico no solo permite identificar áreas aptas para la generación de energía, sino también evaluar su grado de aprovechamiento actual, vinculado a la cartera de proyectos. En función de lo anterior, los proyectos eólicos que actualmente se encuentran en operación, construcción, calificación y aprobados se concentran principalmente en la región del Biobío, particularmente en las provincias de Arauco y Biobío. Tal como lo evidencia la Tabla N°13, las provincias nombradas anteriormente coinciden con los sectores de mayor potencial técnico estimado, lo que indica una buena correspondencia entre el recurso disponible y su aprovechamiento real. En contraste, la región del Ñuble cuenta con menos proyectos asociados, reflejando un menor grado de desarrollo eólico, pese a contar con áreas viables en términos de potencial.

Tabla 13.

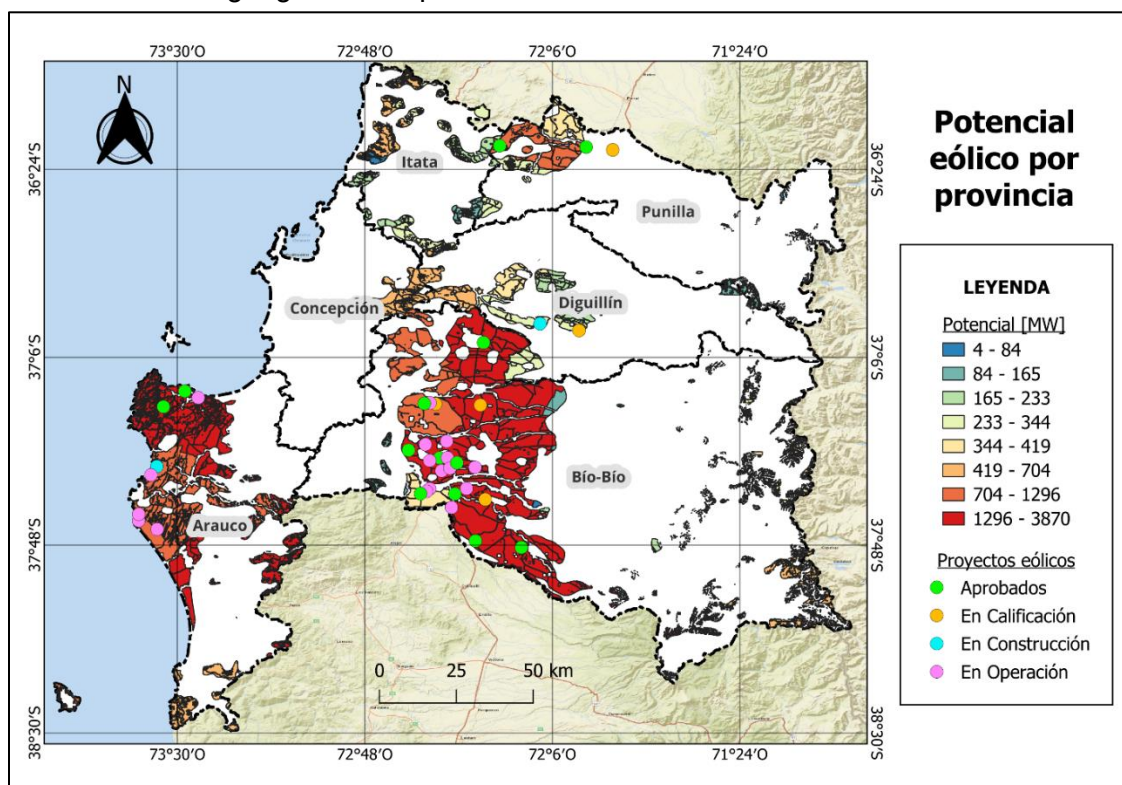
Potencial eólico y superficie distribuido por provincia en MW.

| Región del Biobío | | | Región del Ñuble | | |
|-------------------|----------------|---------------|------------------|----------------|---------------|
| Provincia | Superficie [%] | Potencia [MW] | Provincia | Superficie [%] | Potencia [MW] |
| Arauco | 33 | 5880 | Itata | 31 | 1629 |
| Biobío | 64 | 11582 | Diguillín | 38 | 2006 |
| Concepción | 3 | 561 | Punilla | 31 | 1671 |

| Región del Biobío | | | Región del Ñuble | | |
|-------------------|----------------|---------------|------------------|----------------|---------------|
| Provincia | Superficie [%] | Potencia [MW] | Provincia | Superficie [%] | Potencia [MW] |
| Total | 540665 [ha] | 18022 [MW] | Total | 159175 [ha] | 5306 [MW] |

Figura 9.

Mapa de distribución geográfica del potencial eólico.



Las diferencias observadas en la distribución del potencial eólico se explican principalmente por el factor de planta y por variaciones en la disponibilidad del recurso, así como por la evolución y cambios en el diseño de los aerogeneradores. En el caso de estudio, el factor de planta se utiliza como un umbral de viabilidad, con una variación espacial que parte desde valores mayores o iguales a 0.22, de modo que sólo los píxeles del territorio que presenten dicha característica se consideran aptos para el desarrollo eólico. Cambios en el recurso eólico son capaces de generar cambios en el factor de planta, llevándolo desde, por ejemplo, 0.21 a 0.22, provocando que un área pase de quedar completamente excluida a aportar toda su superficie. Por el contrario, aumentar el umbral desde 0.22 a 0.28 descartaría inmediatamente todas aquellas áreas que presenten factores de planta en ese intervalo, reduciendo drásticamente la superficie con

potencial para el desarrollo eólico. En otras palabras, el factor de planta opera como filtro espacial, de manera que las variaciones locales de este factor determinan la magnitud de las áreas y la distribución final del potencial eólico estimado.

Estudios recientes demuestran que ligeras variaciones en el factor de planta tienen un efecto importante en la generación de energía. Un claro ejemplo, es el estudio realizado por Xu et al. (2023) en Estados Unidos, donde el factor de planta se incrementó de 0.310 en 2010 a un promedio de 0.353 en 2020, elevando la producción anual de energía en aproximadamente un 14%, traduciéndose en aproximadamente 27.99 TWh. Los autores atribuyen este aumento a un repunte de las velocidades del viento luego del año 2010, el cual fue responsable de aproximadamente un 5% del alza promedio del factor de planta durante la década. Sin embargo, a partir del año 2014, la modernización tecnológica se convirtió en la principal fuerza de cambio en el factor de planta, provocando un aumento de este factor en parques nuevos, desde un aproximado de 0.300 en proyectos del año 2014 hasta 0.350 en proyectos del año 2020, aportando cerca de un 12% del incremento total, es decir, unos 20.03 TWh adicionales versus los 8.11 TWh derivados de la velocidad de viento. En la práctica, elevar el requisito de factor de planta equivale a exigir un rendimiento mínimo más exigente.

La Tabla N°14 muestra estas discrepancias al detallar los valores de potencia para dos aerogeneradores distintos bajo un mismo régimen de viento: el Vestas V117 - 3.3 MW (utilizado en este estudio) y el Vestas V126 - 3.3 MW (Ministerio de Energía, 2018). A pesar de compartir la misma potencia nominal, ambas curvas presentan diferencias apreciables en su curva de potencia, atribuibles principalmente a la diferencia en el diámetro de rotor. Considerando velocidades del viento de aproximadamente 10 m/s, el modelo V126 genera diferentes cantidades de energía para una misma velocidad del viento, las cuales son superiores al V117 en un mismo punto dentro del área de estudio (-37,5788, -72,5491), en la provincia del Biobío.

Tabla 14.

Potencia nominal para los aerogeneradores Vestas V117-3,3 MW y Vestas V126-3,3 MW.

| Modelo aerogenerador | Potencia nominal [MW] | Diámetro del rotor [m] | Velocidad del viento [m/s] | Potencia [MW] |
|----------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------|---------------|
| Vestas V117 | 3.3 | 117 | 10 | 2.7 |
| Vestas V126 | 3.3 | 126 | 10 | 3.0 |

Fuente: Ministerio de Energía (2018).

6.2. Rendimiento hídrico anual en el área de estudio

El rendimiento hídrico en el escenario base (Figura N° 10a) refleja el patrón de escurrimiento en las áreas con potencial eólico, considerando los usos de suelo más frecuentes del periodo 2012-2021. Se observa un gradiente hídrico desde la Cordillera de Los Andes hasta el sector costa. Los valores más altos van desde aproximadamente los 1100 mm/año hasta los 2852 mm/año, concentrándose en las laderas precordilleranas, coincidiendo con el uso de suelo bosque (ver Figura N° 11). Por otro lado, la zona de la depresión central concentra los valores más bajos de rendimiento hídrico, con registros iguales o inferiores a los 570 mm/año, en sectores donde predominan la agricultura y plantaciones forestales. Los usos de suelo de este escenario corresponden a un 45% de plantaciones forestales, un 34% de agricultura y un 12% de bosque, con coberturas significativamente menores ocupando el resto del territorio. Las áreas con mayor rendimiento hídrico corresponden a los bosques, ya que, además de ubicarse en zonas de mayor altitud y precipitación, presentan una estructura biofísica que favorece a la regulación hidrológica, permitiendo la mantención de caudales base y la liberación gradual del agua, lo que alimenta acuíferos y mantiene el flujo base incluso en periodos secos (Esse et al., 2021). En contraste, las áreas agrícolas presentan valores inferiores a los bosques, dado que se ha reportado que la expansión de estas áreas se asocia a un aumento en la escurrimiento superficial y a la disminución de la infiltración (Martínez-Retureta et al., 2022). Por otro lado, las zonas agrícolas tienen un mayor rendimiento hídrico que las zonas forestales, ya que estas tienen un rápido crecimiento y poseen mayores tasas de interceptación de precipitación, reduciendo el volumen de agua disponible para escurrimiento (Kuchment, 2022; Martínez-Retureta et al., 2022; Sun et al., 2024).

Los resultados obtenidos por Greßhake et al. (2025) muestran que la energía eólica y la actividad agrícola pueden coexistir, sugiriendo que el suelo agrícola es uno de los entornos socialmente más aptos para la instalación de aerogeneradores. Se ha demostrado que los parques eólicos presentan una baja intensidad territorial promedio, por ejemplo, un aerogenerador de 3 MW requiere aproximadamente 1600 m², alterando menos de 0.4 ha/MW de forma permanente (Dhar et al., 2020), permitiendo al resto del predio desarrollar distintos tipos de cultivos. El escenario futuro evidencia que, tras la conversión de las zonas con potencial eólico a uso agrícola, el rango de rendimiento hídrico va desde los 228 mm/año a los 2844 mm/año. Se observa un aumento del rendimiento hídrico en gran parte de la costa sur y la cordillera de la costa, en que zonas con valores iguales o inferiores a los 570 mm/año pasan a un rango que va desde los 570 mm/año a los 1141 mm/año. Áreas precordilleranas que antes presentaban rendimientos mayores a 1711 mm/año presentan una disminución hacia valores que oscilan entre los 570 mm/año y los 1711

mm/año. La Figura N°11 muestra los cambios en los usos de suelo, en los que el 65% de la superficie, que presentaba usos diferentes al agrícola, se convierten en agricultura, mientras que el restante 35% se mantiene igual.

La comparación del escenario base (Figura N°10a) y el escenario futuro (Figura N°10b) muestra que el rendimiento hídrico se encuentra dominado por la precipitación (ver Figura N°10c), dicho de otro modo, la precipitación explica la mayor parte de la variabilidad observada en los rendimientos hídricos, incluso por sobre otros controladores, como la evapotranspiración, y los cambios en los usos de suelo. En cuencas de montaña se ha demostrado que el clima explica más del 70% de las variaciones anuales del rendimiento hídrico, superando con creces la influencia de los usos de suelo (27%), por lo que cualquier oscilación climática, como sequías prolongadas, puede desplazar el balance hídrico hacia un déficit relativo. Las áreas con precipitaciones ms altas coinciden con los máximos de rendimiento hídrico, mientras que los valores mínimos de rendimiento hídrico se encuentran en zonas cuya precipitación es menor.

Figura 10.

Rendimiento hídrico anual: (a) Escenario base; (b) Escenario futuro; (c) Distribución de la precipitación en ambos escenarios.

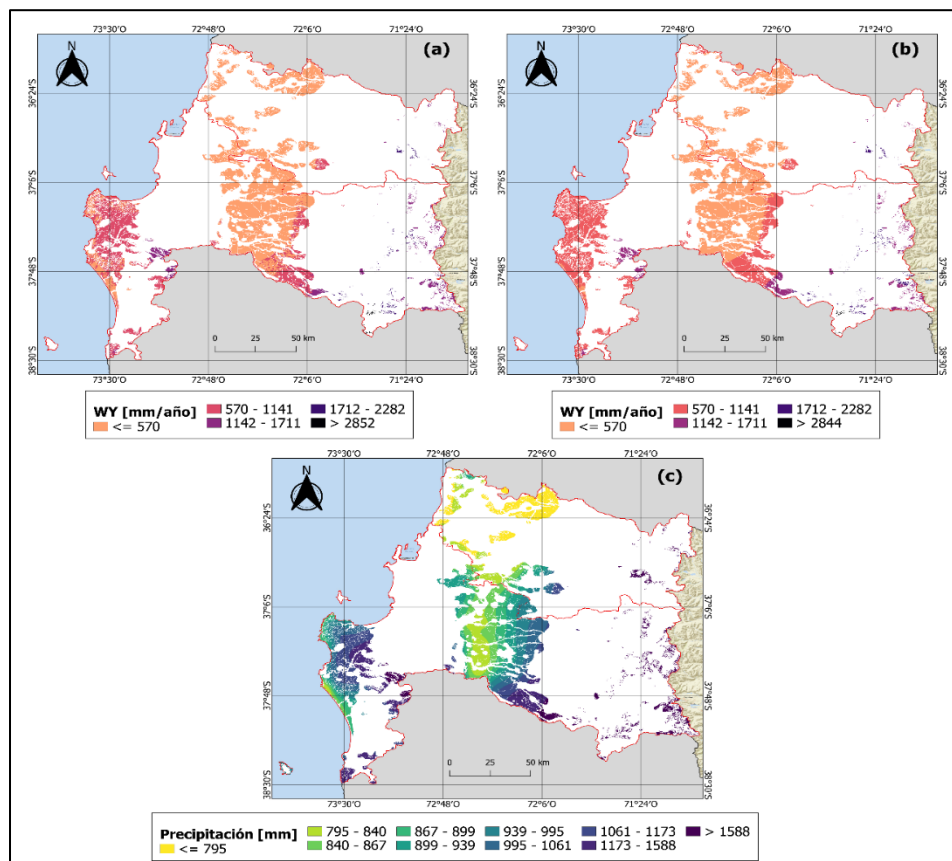
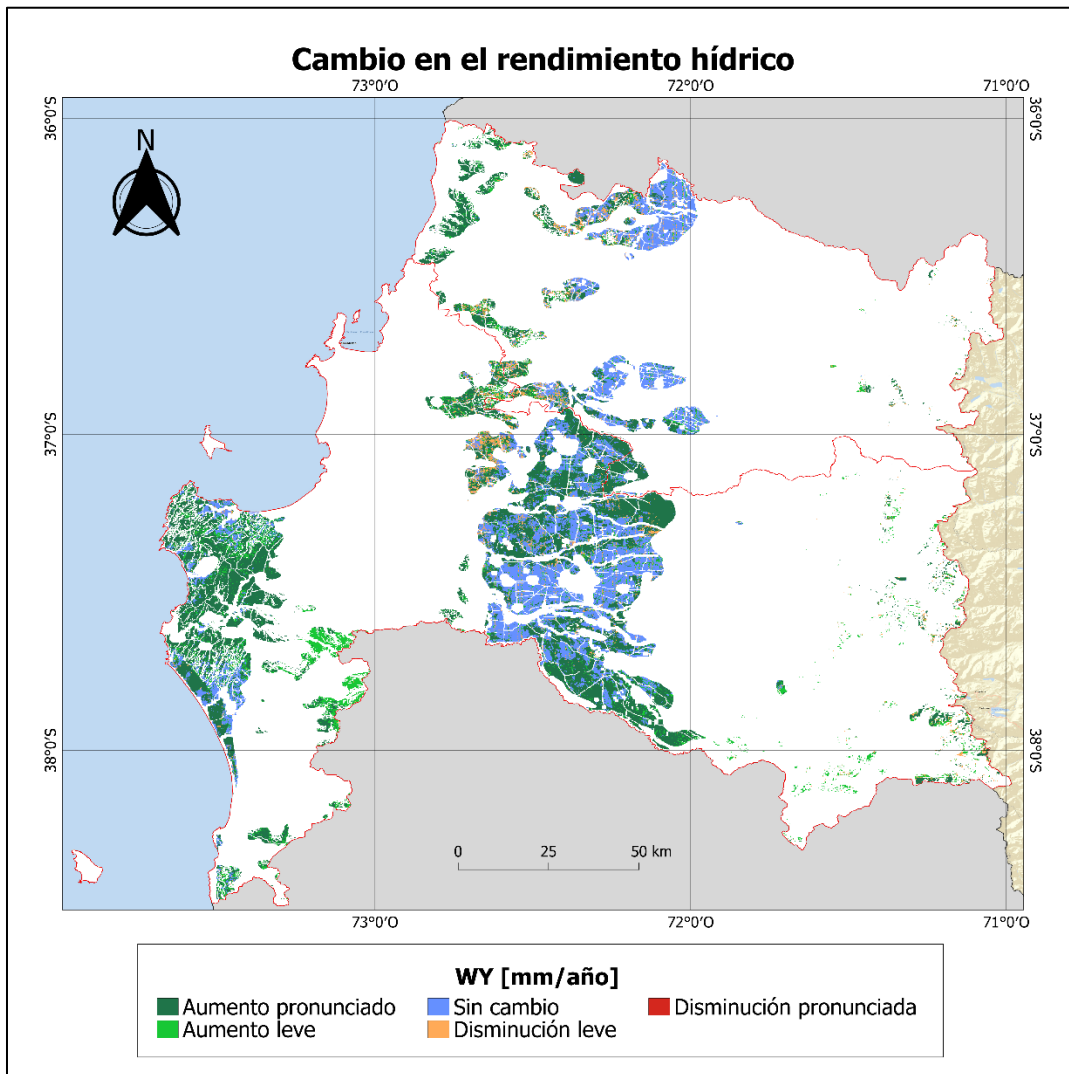


Figura 11.

Usos de suelo en los escenarios base y futuro.



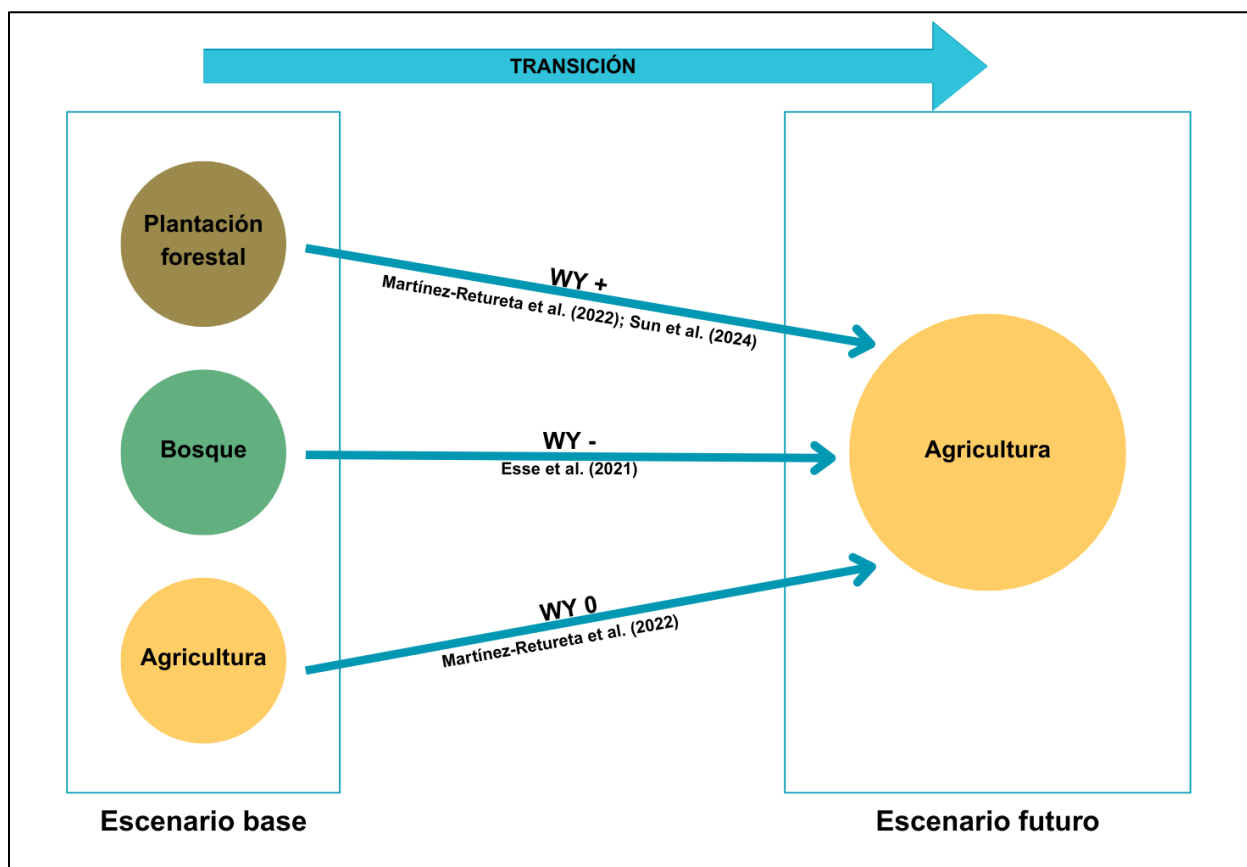
El análisis espacial del cambio en el rendimiento hídrico muestra que gran parte del territorio presenta cambios negativos, reflejando un aumento del rendimiento hídrico futuro en sectores de la depresión central y costa sur, ya que la conversión desde plantaciones forestales puede incrementar la escorrentía superficial debido a la disminución de la cubierta vegetal y de la evapotranspiración al convertir las zonas en uso agrícola (Esse et al., 2021). Sun et al. (2024) señala que las plantaciones forestales presentan menor coeficiente de escorrentía que otros usos de suelo, por lo que su conversión a agricultura puede generar un rendimiento hídrico más alto.

Los cambios positivos, asociados a una disminución del rendimiento hídrico futuro, se observan principalmente en la depresión central de la región del Biobío y el norte de la región de Ñuble, asociándose a la conversión de coberturas boscosas a coberturas agrícolas, lo que produce una reducción en la capacidad del suelo para infiltrar y almacenar agua, debilitando los caudales base. De esta forma, aunque aumenta la escorrentía superficial, el rendimiento hídrico total termina disminuyendo (Esse et al., 2021).

La Figura N°12 sintetiza las principales transiciones de cobertura de suelo asumidas para el desarrollo energético eólico, mostrando que el cambio de plantaciones forestales a uso agrícola tiende a aumentar el rendimiento hídrico, mientras que la conversión desde bosques a agricultura puede disminuirlo.

Figura 12.

Transición de usos de suelo y variación del rendimiento hídrico (WY) entre escenarios.



6.3. Índice hidroenergético

El índice hidroenergético (HEI) se define como la relación entre el rendimiento hídrico anual (WY en mm/año) y el potencial eólico disponible (MW). Este índice permite identificar espacialmente

la cantidad de agua disponible por cada MW de potencia energética. La Figura N°13 muestra espacialmente el HEI en el escenario futuro del rendimiento hídrico anual.

En el escenario futuro, el HEI cuantifica cuánta agua, expresada como escorrentía anual, se genera por cada MW de potencial eólico. Sus valores oscilan entre los 0.20 mm/año/MW y los 27.9 mm/año/MW. Los valores más altos del índice, superiores a 3.0 mm/año/MW, presentan un bajo potencial eólico y una alta disponibilidad hídrica según la Figura N°9 y la Figura N°10, respectivamente. En estas áreas la energía eólica tendría un costo hídrico elevado, ya que se asocia a un mayor volumen de agua por unidad de potencia instalada, lo que reduce su eficiencia desde la perspectiva de uso integrado del territorio. Por otro lado, los valores más bajos del HEI (≤ 0.2 mm/año/MW) se concentran en zonas donde el potencial eólico es alto y el rendimiento hídrico de la zona es más bajo, es decir, son zonas cuya la generación eólica requiere menor cantidad de agua por MW y, por consiguiente, resulta más favorable para el desarrollo eólico.

En el escenario de cambio del rendimiento hídrico en función del potencial eólico (Δ HEI), se observa que los cambios positivos se concentran principalmente en la depresión central (desde la región del Biobío hacia la región del Ñuble) y en algunos sectores costeros de la provincia de Arauco. Por otro lado, los cambios negativos del Δ HEI se distribuyen mayoritariamente en la costa sur, así como en la depresión central de la región del Biobío, indicando que la conversión de tierras desde uso forestal a uso agrícola incrementa el rendimiento hídrico cuando se instala una tecnología eólica. Las áreas sin variación en el rendimiento hídrico coinciden con aquellas que no registraron cambios de uso de suelo, las cuales eran principalmente superficies agrícolas preexistentes, y, en consecuencia, su rendimiento hídrico se mantuvo estable.

El cambio en el índice hidroenergético (Δ HEI) es un indicador que captura la relación entre el agua y el potencial energético del territorio, la cual es condicionada por los cambios en los usos de suelo entre los escenarios modelados. Tal como lo demuestra la Tabla N°15, el contraste de los valores del HEI en el escenario futuro y el escenario de cambio permite ir más allá de la caracterización espacial ya descrita, planteando una discusión orientada hacia la variabilidad hidrológica, energética y la planificación territorial de ambas variables.

Figura 13.

Distribución espacial del índice hidroenergético (HEI).

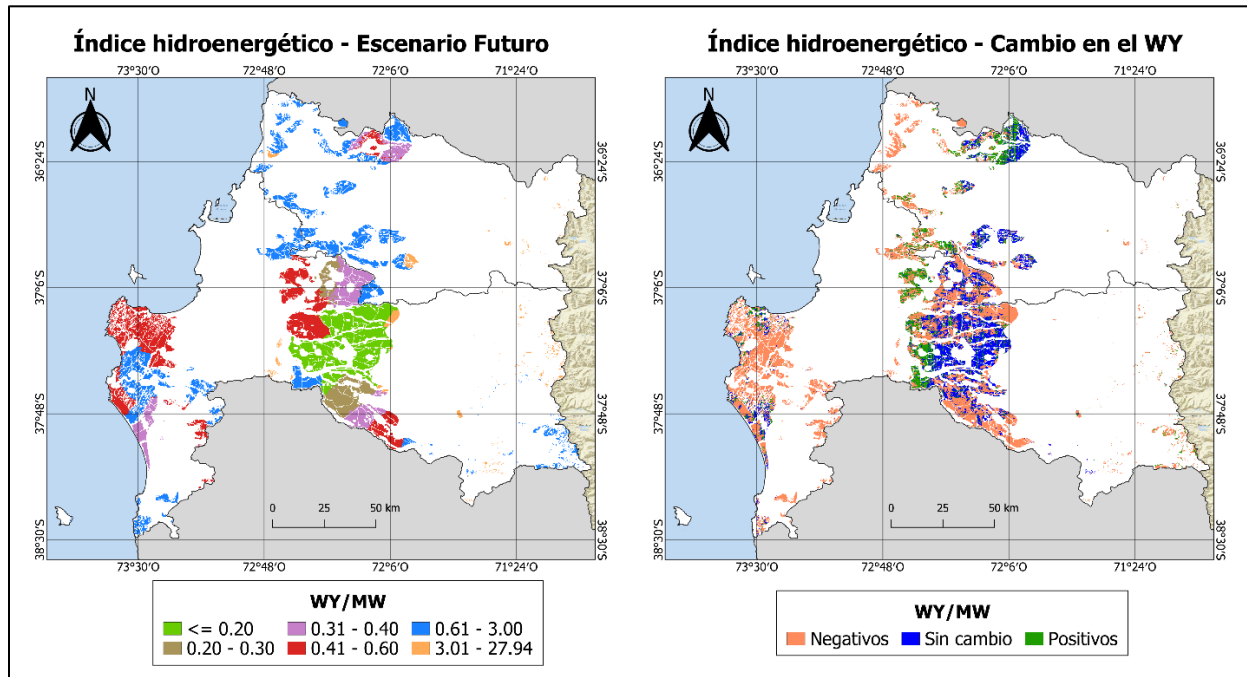


Tabla 15.

Interpretación del índice hidroenergético (HEI) en escenario de cambio del rendimiento hídrico.

| ΔWY | WY Futuro | HEI Futuro | ΔHEI | Significado hidroenergético |
|-------------|-----------|------------|--------------|-----------------------------------|
| + | Disminuye | $HEI < 0$ | - | Menos agua disponible por cada MW |
| - | Aumenta | $HEI > 0$ | + | Más agua disponible por MW |

Aquellas zonas con ΔHEI positivo y con un rendimiento hídrico futuro que aumenta respecto al rendimiento hídrico base, resultan como una oportunidad para la expansión eólica. En estos sectores, debido al aumento del rendimiento hídrico por MW disponible, podrían traducirse en una oportunidad de mitigación de conflictos socioambientales, además de presentar cierta holgura hídrica que puede ser aprovechada por otros servicios ecosistémicos, como los de provisión de alimentos (esto considerando que se presume una transición hacia usos de suelo agrícola).

Por otro lado, las zonas con ΔHEI sin cambio constituyen una zona de equilibrio entre la producción de agua y la potencia eólica. La conversión de estas tierras hacia potencial eólico no altera de forma significativa la relación WY/MW, pero tampoco generan un aumento positivo en

la generación de escorrentía. En este estudio, no se evaluó la inferencia de la oscilación climática, la cual puede desplazar el balance hídrico hacia un déficit relativo, reduciendo su disponibilidad por cada MW instalado (Dai et al., 2020). Por lo tanto, aunque la zona sea compatible con el desarrollo eólico, el dimensionamiento de nuevas instalaciones debiese incluir escenarios de cambio climático, con la finalidad de evitar sobreexplotar el recurso hídrico.

Las zonas Δ HEI negativo representan lugares en los que la instalación eólica es técnicamente factible, pero se generan conflictos con el rendimiento hídrico. Tras la conversión hacia suelos de uso agrícola, el rendimiento hídrico futuro es inferior al rendimiento hídrico base, por lo que cada MW tendría un rendimiento hídrico inferior al que tiene hoy en día, elevando el riesgo de la competencia con distintos usuarios del agua y también pone en juego la mantención de caudales ecológicos en las cuencas intervenidas.

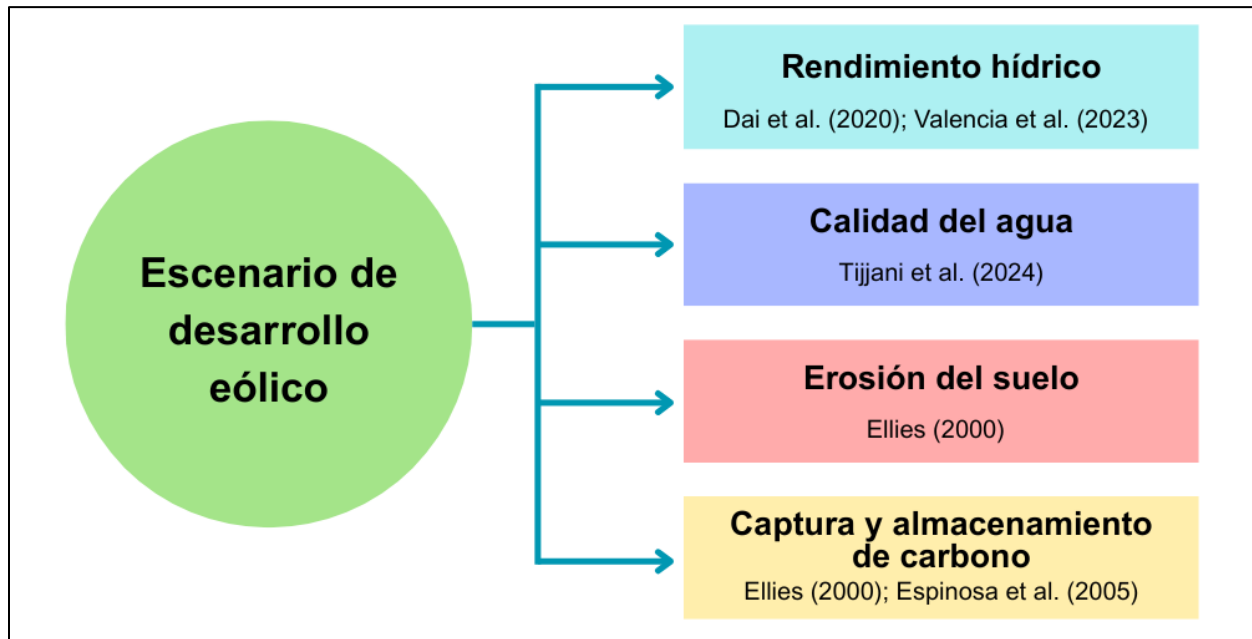
El cambio en índice hidroenergético (Δ HEI) se consolida como una herramienta de diagnóstico territorial que permite discriminar espacialmente aquellas áreas con mayor o menor idoneidad para el desarrollo eólico en contexto del rendimiento hídrico. Al superponer información de escorrentía anual y potencial eólico, el indicador revela en qué zonas, al implementar una tecnología eólica, habría un costo hídrico, además de mostrar espacialmente en qué zonas se pudiese aprovechar la disponibilidad hídrica sin comprometer otros usos. De esta manera, el Δ HEI orienta la planificación territorial energética hacia emplazamientos que maximicen la generación eléctrica con la menor presión adicional sobre el recurso agua, priorizando aquellas zonas con índices bajos o positivos y advirtiendo la necesidad de implementar medidas de gestión en sitios con índices negativos.

7. LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Este estudio presenta dos limitaciones metodológicas clave. La primera se relaciona fundamentalmente con el escenario futuro, que asume que toda el área con potencial eólico se convierte en uso agrícola por considerarse el más compatible con el desarrollo eólico (Martínez-Martínez et al., 2023), la cual facilita la comparación entre el escenario base, pero omite la diversidad real de los usos de suelo en una posible expansión eólica y puede generar trade-offs con otros servicios ecosistémicos, como la calidad del agua, el control de la erosión o el secuestro de carbono. La segunda limitación radica en la simplificación del módulo de rendimiento hídrico anual de InVEST, el cual no diferencia componentes de escorrentía ni contempla las interacciones con aguas subterráneas, lo que limita la precisión del rendimiento hídrico bajo escenarios de variabilidad climática. La Figura N°16 muestran algunos de los servicios ecosistémicos que pudiesen ser impactados en el escenario futuro, considerando la expansión agrícola de este.

Figura 14.

Servicios ecosistémicos potencialmente ser afectados en el escenario de desarrollo eólico.



7.1. Sobrestimación del modelo de rendimiento hídrico

Una de las principales limitaciones en este estudio se vincula directamente con la estimación del rendimiento hídrico en el escenario futuro, en el que todos los usos de suelo fueron variados directamente hacia agrícolas, ya que se considera el uso más compatible con el desarrollo eólico (Martínez-Martínez et al., 2023).

La simplificación de este escenario tiene directa relación con la sobrestimación del modelo de rendimiento hídrico anual al convertir toda la superficie a uso agrícola, la cual reduce la evapotranspiración simulada y aumenta los valores de escurrimiento. Además, se asume que la totalidad del área con potencial puede albergar parques eólicos, sin generar la distribución puntual de los aerogeneradores junto con sus fundaciones.

El modelo de rendimiento hídrico anual de InVEST calcula el índice de evaporación, o dicho de otro modo, la fracción de precipitación que se transforma en escurrimiento, mediante la formulación empleada por Zhang et al. (2004). Uno de los requerimientos del modelo es el coeficiente de cultivo (K_c), el cual, en el escenario futuro, es un único valor dentro toda el área de estudio, representando la generalidad de los cultivos más frecuentes disponibles en ODEPA (2025), los cuales se detallan en el Anexo N°3. La realidad de la agricultura se da a partir de la integración de distintos tipos cultivos, no solo los utilizados en este estudio, por lo que, por ejemplo, disminución del 30% en el K_c resultaría en una disminución de al menos un 10.7% en el rendimiento hídrico (Valencia et al., 2023), afectando directamente a la estimación del índice de aridez y a la evapotranspiración potencial.

Por otro lado, para evitar que toda la zona de potencial eólico quede sujeta a transformaciones indiscriminadas, lo adecuado sería implementar aerogeneradores como transformaciones puntuales dentro de una distribución puntual de los. Esto generaría que cualquier cambio en los usos de suelo se concentre únicamente dentro de los polígonos en los que efectivamente se ubicarán los aerogeneradores, garantizando una mayor heterogeneidad dentro de los usos de suelo en el potencial disponible y facilitando un control más específico de los impactos ambientales que pueden generar. Respecto a lo anterior, Martínez-Martínez et al. (2022) elaboró una grilla de proyectos eólicos dentro de las regiones de Ñuble y Biobío a partir de un mapa de velocidades del viento, y se implementaron restricciones territoriales como filtro inicial, seguido de un buffer de 700 m alrededor de 928 aerogeneradores existentes, según el diámetro de rotor de la tecnología implementada en ese estudio. El resultado final fue una capa de emplazamiento de aerogeneradores de 3.3 MW, probando que incorporar una grilla eólica, en línea con los requerimientos normativos y tecnológicos, es plenamente factible.

La incorporación de esta grilla dentro de la planificación territorial vinculada al rendimiento hídrico permitiría superponer explícitamente el índice hidroenergético con una distribución realista de aerogeneradores, cuantificando el potencial técnico-factible en función de las variaciones del rendimiento hídrico dentro de una cuenca hidrográfica. Adicionalmente, limitar las modificaciones de coberturas al interior de la malla evitaría sobrestimar los cambios de uso de suelo y, por ende,

las posibles alteraciones en el balance hídrico, considerando que es uno de los principales impulsores de cambio en el rendimiento hídrico, pudiendo afectar en un 26.94% los resultados de este (Dai et al., 2020).

7.2. Potenciales efectos en la calidad del agua.

El escenario futuro, cuya superficie con potencial eólico migra hacia un uso de suelo plenamente agrícola, implica mantener y ampliar las tasas actuales de la aplicación de agroquímicos, trasladando dichas presiones a cuencas dominadas por otros usos de suelo. El módulo de rendimiento hídrico anual no incorpora el transporte y destino de contaminantes, por lo tanto, podría sobrestimar o subestimar la proporción de agua utilizable.

Actualmente en Chile el sector agrícola representa una contribución importante en la matriz de exportaciones, las cuales representan un 16.4% del total nacional. Con esto, las ventas de plaguicidas y fertilizantes han aumentado proporcionalmente a la intensificación de la actividad agrícola, cuyas ventas alcanzan los 2.68 kg/ha, versus un promedio 0.98 kg/ha en los países de la OCDE, (Coria & Elgueta, 2022).

Estudios de monitoreo en la macrozona centro-sur de Chile han detectado la presencia de más de 20 pesticidas, además de compuestos organoclorados en cuencas como la del río Cachapoal, río Ñuble y río Chillán, con concentraciones que superan a la normativa europea de 0.1 µg/L (Coria & Elgueta, 2022), los cuales presentan una alta persistencia, bioacumulación y capacidad de transporte. Por ejemplo, fungicidas como el fluazinam o fluopicolide se venden en volúmenes superiores a las 10 ton/año con tiempos de degradación cercanos al año, incrementando el riesgo de lixiviación hacia aguas subterráneas (Concha & Manzano, 2023).

Sumado a lo anterior, se proyecta un aumento significativo en la carga de nutrientes como el fósforo (P) y nitrógeno (N). Utilizando el modelo hidrológico SWAT, Tijjani et al. (2024) demostraron que el cambio climático incrementaría el caudal superficial y, con él, la lixiviación de P y N, elevando sus cargas entre un 9% y 19%. La realidad hidrológica sugiere que, al aumentar las concentraciones de nutrientes en el escenario actual de cambio climático, la expansión agrícola (como el caso del escenario futuro) podría aumentar la eutrofización de cuerpos de agua, y con esto, aumentar costos asociados a potabilización.

Finalmente, la expansión agrícola asociada al escenario futuro no solo intensificaría la demanda de agua para riego, sino que también pondría al sistema hidrológico sobre una carga química importante. Este doble efecto de mayor extracción hídrica y mayor contaminación difusa, compromete el uso de los caudales proyectados, cuestionando la compatibilidad entre la

producción eólica y la seguridad hídrica. Ignorar esta interacción podría conducir hacia una toma de decisiones poco adecuadas a la realidad territorial, trayendo consigo el riesgo latente de incumplir los estándares de protección de cuerpos de agua. Por esto, la planificación energética en las regiones de Ñuble y Biobío debiese atender a la integración explícita de la dinámica de agroquímicos, contemplando modelaciones acopladas a la dinámica agua/contaminantes, además de incorporar evaluaciones de prácticas de manejo orientadas a minimizar la utilización de agroquímicos.

7.3. Erosión producto de la actividad agrícola

La reclasificación del territorio con potencial eólico hacia usos de suelo agrícolas supone intensificar de sobremanera el tránsito de maquinarias, la mecanización de la agricultura e intensificar el laboreo de la actividad sobre suelos que ya han estado expuestos a prácticas poco sostenibles. Según Ellies (2000), la intensificación agrícola en terrenos con pendiente puede elevar las pérdidas de suelo por encima de las 100 ton/ha, muy por encima de la tasa natural de formación de suelos, estimada ente 2 ton/ha y 8 ton/ha al año. En Chile se registran 36.5 millones de ha con algún grado de erosión, de las cuales 18.1 millones corresponden daños severos o muy severos (Cartes Sánchez, 2013).

El laboreo convencional elimina la cubierta vegetal y facilita el desprendimiento de partículas por el impacto de la precipitación. Particularmente, en Chile, se pierden aproximadamente 15 mil ha de suelo fértil solo producto de la erosión hídrica. Ellies (2000) demostró que la labranza de invierno sin cobertura vegetal (práctica de airear el suelo para permitir la permeabilidad de humedad y aire) reduce la pérdida de suelo en un 12%, versus un 75% de pérdida asociado a la siembra directa. Por otro lado, la compactación generada por presiones superiores a los 200 kPa disminuye la conductividad hidráulica de 100 cm/día a 10 cm/día (Fleige et al., 2016), favoreciendo el escurrimiento superficial, el transporte de sedimentos y junto con ellos un mayor arrastre de nutrientes y contaminantes agrícolas hacia los cuerpos de agua.

En cuanto a las cargas sólidas asociadas al aumento de la erosión producto de la expansión agrícola, se tiene que la turbidez se ve elevada, rellenando el terreno producto de la sedimentación transportada por el agua, donde se ven menoscabados hábitats bentónicos y alteradas la redes tróficas (Wantzen & Mol, 2013). En Chile, los sedimentos provenientes de actividades agrícolas ya han reducido la vida útil de embalses y se han perdido aproximadamente 400 km de distintos ríos navegables, además de aumentar la eutroficación de fuentes de agua gracias al aporte de nutrientes (Ellies, 2000).

En el contexto de este estudio, la expansión agrícola planteada en el escenario futuro no solo aumentaría la demanda de extracción hídrica, sino que intensificaría drásticamente los procesos erosivos asociados. La pérdida de suelo fértil y el aumento de sedimentos en cursos de agua y embalses compromete la capacidad de retención y regulación hídrica de las cuencas de las regiones de Ñuble y Biobío, reduciendo significativamente la cantidad de agua aprovechable, como la vida útil de la infraestructura hidráulica.

7.4. Captura y almacenamiento de carbono

Tras la implementación del escenario futuro, se presume una pérdida inmediata de los principales sumideros terrestres de carbono en las regiones de Ñuble y Biobío: árboles nativos y plantaciones forestales. Esto traería consigo un manejo de las emisiones de carbono que difícilmente pueden ser reemplazadas y mitigadas de manera masiva.

Actualmente, las regiones de Ñuble y Biobío tienen una presencia en la actividad forestal marcada a escala nacional, con plantaciones de, por ejemplo, *Pinus radiata*, a lo largo y ancho del territorio. Estas plantaciones, solo al año 2000, almacenaban aproximadamente 67 Mton de carbono, cuyas proyecciones alcanzarían las 169 Mton de carbono si se sigue con la rotación forestal al año 2060, con una tasa promedio de 1.70 Mton/año (Espinosa et al., 2005). En este contexto, la conversión de dichas superficies a cultivos de rotación anual provocaría la liberación de la mayor parte del carbono secuestrado en forma de dióxido de carbono y, en menor medida, de metano producto de la quema o descomposición de materia orgánica. Adicionalmente, las pérdidas de carbono del suelo, asociados al laboreo, incrementarían la deuda de carbono, que históricamente se ha generado al reemplazar vegetación leñosa por agricultura.

El secuestro de carbono puede presentar sinergias con otros servicios ecosistémicos, como lo es el control de la erosión, el cual se pudiese ver agravado producto del déficit de carbono, pues la exportación de materia orgánica reduciría la fracción estabilizada del carbono del suelo (Ellies, 2000; Zhang et al., 2024). De acuerdo con las tasas de pérdida de suelo (más de 100 ton/ha al año), la formación natural del suelo (ente 2 ton/ha y 8 ton/ha al año) sería incapaz de reponer el carbono perdido, generando una degradación productiva y climática (Ellies, 2000).

Finalmente, la expansión agrícola en el escenario futuro provocaría una pérdida neta de carbono, superior al potencial de secuestro que las mejores prácticas agrícolas podrían ofrecer. Por otro lado, el modelo de rendimiento hídrico anual no contabiliza los impactos que pueden ser generados producto de los escenarios, sobrestimando los beneficios hidrológicos al pasar por alto las emisiones de dióxido de carbono integradas en la transición de uso de suelo. Lo anterior

resulta en la necesidad de evaluar de forma integral los posibles trade-offs entre la generación eólica y el impacto en los múltiples servicios ecosistémicos.

8. CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Tabla 16.

Contribución de la investigación a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

| ODS | Justificación |
|-------------------------------------|---|
| Agua limpia y saneamiento | <p>Este estudio contribuye de manera directa a la implementación de la gestión integrada de recursos hídricos al analizar los posibles impactos de la expansión de la energía eólica sobre el servicio ecosistémico de rendimiento hídrico. La modelación utilizada evalúa un escenario futuro que implicaría cambios en los usos de suelo hacia agrícola, identificando que dichos cambios pueden aumentar la escorrentía superficial, pero reducir la capacidad de infiltración, aumentar la erosión y comprometer la calidad del agua por un aumento de cargas de sedimentos y agroquímicos (Coria & Elgueta, 2022; Ellies, 2000).</p> <p>Adicionalmente, se muestra cómo las proyecciones de mayor demanda hídrica para el riego y el aumento de contaminación difusa pueden alterar los caudales disponibles, afectando la disponibilidad de agua para consumo humano.</p> |
| Energía asequible y no contaminante | <p>La cuantificación de zonas con alto potencial eólico en las regiones de Ñuble y Biobío contribuyen un aumento de la participación de energías renovables en la matriz energética nacional. Mediante el análisis espacial de las zonas con potencial eólico se demostró que las oportunidades de incrementar la generación renovable facilitan las metas de descarbonización al año 2050.</p> <p>No obstante, el desarrollo eólico no queda exento de impactos ambientales, principalmente a los asociados a los usos de suelo, los cuales podrían afectar a la disponibilidad y calidad del agua. Al abortar estos impactos en la planificación energética, este estudio promueve una expansión eólica sostenible, integrando criterios de conservación de servicios ecosistémicos y eficiencia hídrica.</p> |

Fuente: Organización de las Naciones Unidas (2015)

9. CONCLUSIONES

La presente investigación evaluó el desarrollo y expansión de la energía eólica sobre el rendimiento hídrico anual en las regiones de Ñuble y Biobío, a través de la elaboración de un escenario base y un escenario futuro (que presume una máxima expansión de las zonas con potencial eólico), se analizó la variación espacial del rendimiento hídrico anual utilizando el modelo del software InVEST, permitiendo estimar cuantitativamente la magnitud y dirección de dichos cambios en el área de estudio.

Este estudio contribuye con una aproximación espacial y cuantitativa para evaluar la relación entre el desarrollo energético eólico y el rendimiento hídrico anual en Chile, demostrando que la transición hacia energías renovables requiere de un enfoque integral que considere los posibles trade-offs con otros servicios ecosistémicos. Esto demostraría que la generación eólica puede avanzar de forma compatible con la seguridad hídrica y la conservación de los ecosistemas si se implementan estrategias de planificación territorial basadas en la evidencia científica.

La elaboración del escenario de desarrollo eólico permitió cuantificar y ver de forma espacial el potencial técnico-factible de generación eólica, demostrando que la región del Biobío cuenta con un potencial de 18022 MW distribuidos en 540665 ha, mientras que la región del Ñuble alcanza los 5306 MW en 159175 ha, reflejando claras diferencias entre ambas regiones.

En cuanto a la estimación del rendimiento hídrico entre un escenario base y un escenario de desarrollo eólico, se tiene que el modelo de rendimiento hídrico anual de InVEST evidenció que la conversión de suelos con potencial eólico hacia uso agrícola genera incrementos focalizados del rendimiento hídrico en zonas que previamente estaban dominadas por plantaciones forestales, así como una reducción de este en áreas de bosque nativo. Este comportamiento se relaciona con las diferencias de cobertura vegetal entre ambos escenarios, cuyos coeficientes de cultivos se ven condicionados en función de estas, los cuales afectan directamente a las tasas de evapotranspiración, demostrando que los cambios en los usos de suelo afectan la disponibilidad hídrica de forma heterogénea.

La integración de un índice hidroenergético (HEI) permitió evaluar la relación entre la disponibilidad hídrica de un territorio y el potencial eólico disponible. Los resultados mostraron que aquellas zonas cuya reconversión de usos de suelo hacia agrícola incrementaron la escorrentía por cada MW general (o con un Δ HEI positivo) se concentran principalmente en sectores de la depresión intermedia, constituyendo zonas de oportunidad para la expansión eólica, ya que no comprometería la disponibilidad hídrica local. Por el contrario, las zonas con

Δ HEI negativo se ubican principalmente en la costa sur, reflejando áreas en las que la conversión de bosque a agricultura resultó en una disminución del rendimiento hídrico por MW instalado, lo que puede generar conflictos con la seguridad hídrica. Este hallazgo destaca la importancia de considerar de forma explícita los usos de suelo preexistentes y hacia dónde migrarán, además de planificar de forma estratégica y sustentable la instalación de aerogeneradores en zonas donde se maximice el aprovechamiento del potencial eólico sin comprometer la disponibilidad de agua.

Las principales limitaciones encontradas en el desarrollo de esta investigación se relacionan directamente con la simplificación del escenario futuro, que convierte en su totalidad el suelo con potencial eólico a uso agrícola, pudiendo distorsionar la respuesta hidrológica del territorio; y el alcance del modelo de rendimiento hídrico anual de InVEST, que no desagrega los componentes del balance hídrico ni incorpora otros servicios ecosistémicos. Próximas investigaciones debiesen elaborar la distribución espacial de los aerogeneradores y sus fundaciones para representar cambios puntuales en los usos de suelo, además de acoplar modelos que diferencien los distintos flujos del balance hídrico en conjuntos con los potenciales impactos en otros servicios ecosistémicos bajo escenarios de cambio climático, de modo de ofrecer evaluaciones más completas para la planificación energética.

10. REFERENCIAS

Allan, R., Pereira, L., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56* (Vol. 56).

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, 300(9), D05109.

BCN. (2018). *Mapas Vectoriales* https://www.bcn.cl/siit/mapas_vectoriales

BCN. (2024). *Biblioteca del Congreso Nacional*. <https://www.bcn.cl/portal/>

Boisier, J. P. (2023). *CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for the period 1960-2021 in continental Chile*. (v2.5) [Data set]. Zenodo. (<https://doi.org/10.5281/zenodo.7529682>)

Budyko M.I. (1974). Climate and life.

Budyko, M. I. (1974). Climate and life. In. New York: Academic Press.

Camuffo, D., Becherini, F., & Della Valle, A. (2021). *How the Rain-Gauge Threshold Affects the Precipitation Frequency and Amount*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1009389/v1>

Carrasco-Valencia, L., Vilca-Campana, K., Iruri-Ramos, C., Cárdenas-Pillco, B., Ollero, A., & Chanove-Manrique, A. (2024). Effect of LULC Changes on Annual Water Yield in the Urban Section of the Chili River, Arequipa, Using the InVEST Model. *Water*, 16(5). <https://doi.org/10.3390/w16050664>

Cartes Sánchez, G. (2013). Degradación de suelos agrícolas y el SIRSD–S. <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/articulos/degradacion-de-suelos-agricolas-y-el-sirsd-s>

Chang, T. P. (2011). Estimation of wind energy potential using different probability density functions. *Applied Energy*, 88(5), 1848-1856. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.010>

Chen, X., Lin, S., Tian, J., Wang, Y., Ye, Y., Dong, S., Gong, X., Lin, Q., & Zhu, L. (2024). Simulation study on water yield service flow based on the InVEST-Geoda-Gephi network: A case study on Wuyi Mountains, China. *Ecological Indicators*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111694>

Comisión Nacional de Energía. (2024). *Energía Abierta Ciudadana*. https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2024/06/RCiudadano_v202406.pdf

CONAF. (2019). *Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado* <https://ide.minagri.gob.cl/geoweb/2019/11/21/medio-ambiente/>

Concha, C., & Manzano, C. A. (2023). Priority pesticides in Chile: Predicting their environmental distribution, bioaccumulation, and transport potential. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 19(3), 676-683. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ieam.4680>

Coria, J., & Elgueta, S. (2022). Towards safer use of pesticides in Chile. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(16), 22785-22797. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18843-6>

Dai, E., Yin, L., Wang, Y., Ma, L., & Tong, M. (2020). Quantitative Assessment of the Relative Impacts of Land Use and Climate Change on the Key Ecosystem Services in the Hengduan Mountain Region, China. *Sustainability*, 12(10).

DGA. (2024). *Inventario de Cuencas* <https://dga.mop.gob.cl/mapoteca-digital/>

Dhar, A., Naeth, M. A., Jennings, P. D., & Gamal El-Din, M. (2020). Perspectives on environmental impacts and a land reclamation strategy for solar and wind energy systems. *Science of the Total Environment*, 718, 134602. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134602>

Dirección General de Aeronáutica Civil. (2024). Precipitación Instantánea In: Departamento de Climatología, Subdirección de Climatología y Metodología

Dirección Meteorológica de Chile. (2025). *Horas De Sol: horas de Sol horaria, diaria, mensual y valores totales* <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/requerimiento/producto/RE1011>

División Energías Sostenibles. (2021). Potenciales de Energías Renovables (PELP) 2023-2027. In.

Donohue, R. J., Roderick, M. L., & McVicar, T. R. (2012). Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model. *Journal of Hydrology*, 436-437, 35-50. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.033>

Droogers, P., & Allen, R. G. (2002). Estimating Reference Evapotranspiration Under Inaccurate Data Conditions. *Irrigation and Drainage Systems*, 16(1), 33-45. <https://doi.org/10.1023/A:1015508322413>

Dunkerley, D. (2008). Identifying individual rain events from pluviograph records: A review with analysis of data from an Australian dryland site. *Hydrological Processes*, 22, 5024-5036. <https://doi.org/10.1002/hyp.7122>

Ellies, A. (2000). Soil erosion and its control in Chile - An overview. *Acta geológica hispánica, ISSN 0567-7505, Vol. 35, Nº 3-4, 2000 (Ejemplar dedicado a: Assesment of soil erosion and sedimentation through the use of the 137Cs and related techniques), pags. 279-284, 35.*

Espinosa, M., Acuña, E., Cancino, J., Muñoz, F., & Perry, D. (2005). Carbon sink potential of radiata pine plantations in Chile. *Forestry*, 78, 11-19. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpi002>

Esse, C., Ríos, N., Saavedra, P., Fonseca, D., Encina-Montoya, F., Santander-Massa, R., De los Ríos-Escalante, P., Figueroa-Muñoz, G., López-Pérez, A., & Correa-Araneda, F. (2021). Effects of land use change on water availability and water efficiency in the temperate basins of south-central Chile. *Journal of King Saud University - Science*, 33(8), 101650. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101650>

Fick, S., & Hijmans, R. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>

Fleige, H., Beck-Broichsitter, S., Dörner, J., Goebel, M.-O., Bachmann, J., & Horn, R. (2016). Land use and soil development in southern Chile: Effects on physical properties. *Journal of soil science and plant nutrition*, 16, 818-831. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-95162016000300018&nrm=iso

Fuh, B.-p. (1981). On the calculation of the evaporation from land surface. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 5(1), 23-31. <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1981.01.03>

Geng, X., Wang, X., Yan, H., Zhang, Q., & Jin, G. (2014). Land Use/Land Cover Change Induced Impacts on Water Supply Service in the Upper Reach of Heihe River Basin. *Sustainability*, 7(1), 366-383. <https://doi.org/10.3390/su7010366>

Gondor, A., Gonzalez, J. D. D., Leon, J., Herron, C., & Hesselbach, H. (2014). Delineation of action areas to achieve replenishment goals for Guatemala City.

Greßhake, L., Stephan, B., Robin, T., & Holzhammer, U. (2025). What do you mean by '(un-)suitable'? Analysing the diversity of social acceptance towards the deployment of renewable energies in different landscapes. *Journal of Land Use Science*, 20(1), 117-150. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2025.2499280>

Haines-Young, R. (2023). *Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.2 Guidance on the Application of the Revised Structure*. www.cices.eu

Haines-Young, R., & Potschin, M. (2018). *Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 Guidance on the Application of the Revised Structure*. <https://cices.eu/content/uploads/sites/8/2018/01/Guidance-V51-01012018.pdf>

Hamel, P., & Guswa, A. J. (2015). Uncertainty analysis of a spatially explicit annual water-balance model: case study of the Cape Fear basin, North Carolina. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19(2), 839-853. <https://doi.org/10.5194/hess-19-839-2015>

Hastik, R., Basso, S., Geitner, C., Haida, C., Poljanec, A., Portaccio, A., Vrščaj, B., & Walzer, C. (2015). Renewable energies and ecosystem service impacts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 608-623. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.004>

Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G. B. M., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., Shangguan, W., Wright, M. N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B., Guevara, M. A., Vargas, R., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Leenaars, J. G. B., Ribeiro, E., Wheeler, I., Mantel, S., & Kempen, B. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLOS ONE*, 12(2), e0169748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>

IRENA. (2023). *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway*. International Renewable Energy Agency Abu Dhabi. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jun/IRENA_World_energy_transitions_outlook_2023.pdf

Kuang, W., Hou, Y., Dou, Y., Lu, D., & Yang, S. (2021). Mapping Global Urban Impervious Surface and Green Space Fractions Using Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 13(20).

Kuchment, L. (2022). The effects of Forest on annual water yield of river watershed. *Water Resources*, 49(1), 38-45.

MapBiomass Chile. (2024). *Colección 1.0 de la Serie Anual de Mapas de Cobertura y Uso del Suelo de Chile*. <https://chile.mapbiomas.org/>

Martínez-Martínez, Y., Dewulf, J., Aguayo, M., & Casas-Ledón, Y. (2023). Sustainable wind energy planning through ecosystem service impact valuation and exergy: A study case in south-central Chile. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 178. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113252>

Martínez-Martínez, Y., Dewulf, J., & Casas-Ledón, Y. (2022). GIS-based site suitability analysis and ecosystem services approach for supporting renewable energy development in south-central Chile. *Renewable Energy*, 182, 363-376. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.008>

Martínez-Retureta, R., Aguayo, M., Abreu, N. J., Urrutia, R., Echeverría, C., Lagos, O., Rodríguez-López, L., Duran-Llacer, I., & Barra, R. O. (2022). Influence of Climate and Land Cover/Use Change on Water Balance: An Approach to Individual and Combined Effects. *Water*, 14(15).

Martínez, Y. (2023). *Methodological Framework To Include Ecosystem Services In Spatial Renewable Energy Planning* [Universidad de Concepción].

Ministerio de Energía. (2014). Energías renovables en Chile: El potencial eólico, solar e hidroeléctrico de Arica a Chiloé. <https://doi.org/https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/58ae4c65-30e2-4435-9458-baa223026df3>

Ministerio de Energía. (2018). *Explorador Eólico- Recursos SIG* <https://eolico.minenergia.cl/sig>

Ministerio de Energía. (2021a). *Identificación y Cuantificación de Potenciales de Energías Renovables*. <https://energia.gob.cl/documentos/mine-2021-identificacion-y-cuantificacion-de-potenciales-de-energias-renovables>

Ministerio de Energía. (2021b). *Planificación Energética de Largo Plazo (PELP)*. https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/pelp2023-2027_informe_preliminar.pdf

Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2021). *Instrumentos de Planificación Territorial* <https://ide.minvu.cl/pages/descargas>

Muñoz, A. B., Díez, A. R., Velasco, M. J. P., Marín, R. G., & Delicado, A. (2023). Energías renovables y cambios de usos del suelo en el sur de la Península Ibérica: una lectura territorial de la política energética. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*(97), 9.

Natural Capital Project. (2024). *INVEST 0.0*. In *Stanford University, University of Minnesota, Chinese Academy of Sciences, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, Stockholm Resilience Centre and the Royal Swedish Academy of Sciences* <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>

Niño Villamizar, Y. A., Nieves Plata, M. E., & Cortés Jiménez, C. A. (2023). Desafíos de la transición energética sostenible: perspectivas para la investigación y la gestión. *Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión*, 31(2), 137-158.

ODEPA. (2025). *Estadísticas productivas* <https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/estadisticas-productivas>

Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Picchi, P., van Lierop, M., Geneletti, D., & Stremke, S. (2019). Advancing the relationship between renewable energy and ecosystem services for landscape planning and design: A literature review. *Ecosystem Services*, 35, 241-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.12.010>

Posso, F., Acevedo, J., & Hernández, J. (2014). El impacto económico de las energías renovables. *Aibi revista de investigación, administración e ingeniería*, 2(2), 22-26.

Prados, M. J., Baraja, E., Frolova, M., & Espejo, C. (2012). Integración paisajística y territorial de las energías renovables. *Ciudad Y Territorio Estudios Territoriales*, 127-143.

Pratiwi, S., & Juerges, N. (2020). Review of the impact of renewable energy development on the environment and nature conservation in Southeast Asia. *Energy, Ecology and Environment*, 5(4), 221-239. <https://doi.org/10.1007/s40974-020-00166-2>

Schallenberg Rodríguez, J. C., Piernavieja Izquierdo, G., Hernández Rodríguez, C., & Unamunzaga Falcón, P. (2008). Energías renovables y eficiencia energética. In: Instituto Tecnológico de Canarias.

Sun, S., Xiang, W., Shuai, O., Hu, Y., & Peng, C. (2024). Balancing Water Yield and Water Use Efficiency Between Planted and Natural Forests: A Global Analysis. *Global Change Biology*, 30, e17561. <https://doi.org/10.1111/gcb.17561>

Tijjani, S. B., Qi, J., Giri, S., & Lathrop, R. (2024). Crop production and water quality under 1.5 °C and 2 °C warming: Plant responses and management options in the mid-Atlantic region. *Science of the Total Environment*, 907, 167874. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167874>

Turkovska, O., Gruber, K., Klingler, M., Klöckl, C., Ramirez Camargo, L., Regner, P., Wehrle, S., & Schmidt, J. (2024). Methodological and reporting inconsistencies in land-use requirements misguide future renewable energy planning. *One Earth*, 7(10), 1741-1759. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.09.010>

U.S. Geological Survey. (2012). *earthexplorer.usgs* <https://earthexplorer.usgs.gov>

Valencia, J. B., Guryanov, V. V., Mesa-Diez, J., Tapasco, J., & Gusarov, A. V. (2023). Assessing the Effectiveness of the Use of the InVEST Annual Water Yield Model for the Rivers of Colombia: A Case Study of the Meta River Basin. *Water*, 15(8).

Varcoe, R., & Sterling, S. (2017). Does Evapotranspiration Increase When Forests are converted to Grasslands? EGU General Assembly Conference Abstracts,

Wantzen, K. M., & Mol, J. H. (2013). Soil Erosion from Agriculture and Mining: A Threat to Tropical Stream Ecosystems. *Agriculture*, 3(4), 660-683. <https://www.mdpi.com/2077-0472/3/4/660>

Xu, J., Zou, J., Ziegler, A. D., Wu, J., & Zeng, Z. (2023). What drives the change of capacity factor of wind turbine in the United States? *Environmental Research Letters*, 18(6), 064009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acce4f>

Zhang, K., Liu, Z., McCarl, B. A., & Fei, C. J. (2024). Enhancing Agricultural Soil Carbon Sequestration: A Review with Some Research Needs. *Climate*, 12(10), 151. <https://www.mdpi.com/2225-1154/12/10/151>

Zhang, L., Hickel, K., Dawes, W. R., Chiew, F. H. S., Western, A. W., & Briggs, P. R. (2004). A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. *Water Resources Research*, 40(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2003WR002710>

11. ANEXOS

Anexo N°1: Proyectos eólicos en el área de estudio.

Tabla 17.

Proyectos eólicos en el área de estudio.

| Proyecto | Estado al 13/01/2025 | Altura de buje (m) | Potencia nominal (MW) | Modelo del aerogenerador |
|---|-------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Parque Eólico Andino Suiza | En Calificación | 145 | 7,2 | Vestas V172 |
| Parque Eólico Los Coihues | En Calificación | 145 | 7,2 | Vestas V172 |
| Parque Eólico San Carlos | En Calificación | 167 | 7,5 | - |
| Parque Eólico El Rosal | En Calificación | 150 | 6,6 | - |
| Parque Eólico Junquillos | En Calificación | 165 | 7,5 | - |
| Parque Eólico Pemuco | Aprobado | 155 | 6,2 | - |
| Parque Eólico Culenco | Aprobado | 166 | 8 | - |
| Parque Eólico Rinconada | En Calificación | 140 | 6,0 | - |
| Parque Eólico San Matías | Aprobado | 140 | 4,3 | - |
| Parque Eólico Don Álvaro | Aprobado | 140 | 6,0 | - |
| Parque Eólico Rarinco | Aprobado | 164 | 5,5 | - |
| Parque Eólico Cabrero | Aprobado | 167 | 5,6 | - |
| Parque Eólico Newen Küruf | Aprobado | 150 | 5,6 | - |
| Modificación Canalización Subterránea Parque Eólico Alena | Aprobado | 120 | 4,8 | - |
| Parque Eólico Viento Sur | Aprobado | 100 - 140 | 4,5 - 5 | - |
| Parque Eólico Lebu Norte | Aprobado | 140 | 4,8 | - |
| Proyecto Eólico Vientos Del Pacífico | Aprobado | 160 | 3,3 | - |
| Parque Eólico Entre Ríos | Aprobado | 165 | 4,5 | - |
| Proyecto Eólico Coihue Parque Eólico Buenaventura | Aprobado | 134 | 3,5 | - |
| Parque Eólico La Esperanza li | Aprobado | 120 | 3,5 | - |

| Proyecto | Estado al 13/01/2025 | Altura de buje (m) | Potencia nominal (MW) | Modelo del aerogenerador |
|---|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Parque Eólico Piedra Amarilla | Aprobado | 120 | 3,3 | - |
| Parque Eólico El Maitén | Aprobado | 120 | 3,45 | - |
| Parque Eólico El Nogal | Aprobado | 120 | 3,45 | - |
| Parque Eólico Lomas De Duqueco | Aprobado | 140 | 4,2 | - |
| Parque Eólico Rihue | Aprobado | 117 | 3,3 | Vestas V126 |
| Parque Eólico Los Olmos | Aprobado | 100 | 3,3 | - |
| Parque Eólico El Arrebol | Aprobado | 114 | 3,3 | - |
| Parque Eólico La Esperanza | Aprobado | 120 | 2,5 | - |
| Ampliación Iii Parque Eólico Lebu - Cristoro | Aprobado | 65 80 | 1,75 3,0 | Vestas V66 Vestas V90 |
| Parque Eólico Campo Lindo | Aprobado | 116,5 | 3,3 | - |
| Parque Eólico Mulchén | Caducado | 95 | 3,3 | - |
| Parque Eólico Los Buenos Aires | Aprobado | 95 | 3,3 | - |
| Parque Eólico Mesamávida | Aprobado | 100 | 2,4 | Vestas V110 |
| Parque Eólico Negrete | Aprobado | 120 | 3,0 | - |
| Ampliación Ii Parque Eólico Lebu - Cristoro | Aprobado | 67 | 1.75 | Vestas V66 |
| Parque Eólico Las Peñas | Aprobado | 120 | 3,0 | Vestas V100 Vestas V112 |
| Parque Eólico San Manuel | Aprobado | 120 | 2,5 | - |
| Parque Eólico Alena | Aprobado | 120 | 2.5 | - |
| Parque Eólico Raki | Aprobado | 85 | 1,5 | Vestas V112 |
| Parque Eólico Cuel | Aprobado | 100 | 1,6 | Goldwind GW82/1500 |
| Parque Eólico Lebu Segunda Etapa. | Aprobado | 90 | 2,0 | Vestas V-80 |
| Parque Eólico Arauco | Aprobado | 80 | 2,0 | Vestas V-90 |

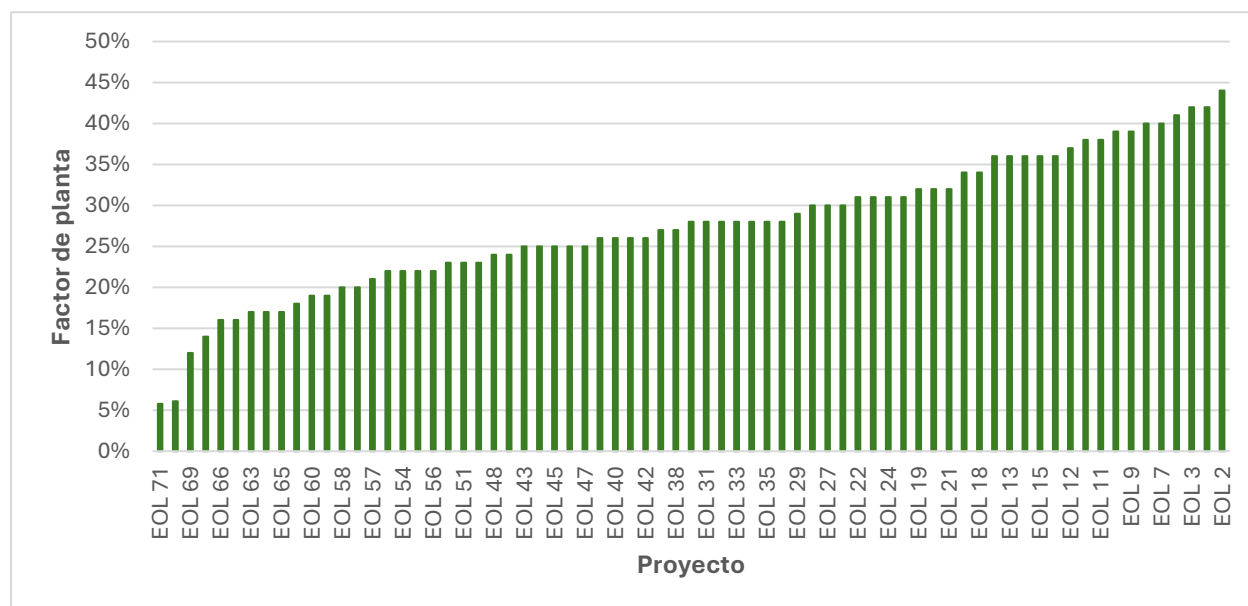
| Proyecto | Estado al 13/01/2025 | Altura de buje (m) | Potencia nominal (MW) | Modelo del aerogenerador |
|---|----------------------|--------------------|-----------------------|---|
| Parque Eólico Lebu Sur (E-Seia) | Aprobado | 60-78 | 2,0 | Vestas V-80 |
| Ampliación Parque Eólico Lebu Parque Eólico Lebu (E-Seia) | Aprobado | 40-60 47,48 | 0,6 0,78 | Bonus 600 KW MK IV HW 50/780 WTGS |
| Parque Eólico Chome | Caducado | 60-78 | 2,0 | Vestas V-80 |
| Parque Eólicos Altos De Hualpén | Caducado | 67 | 2,0 | Vestas V-80 |

Fuente: Elaboración propia a partir de Ministerio de Energía (2014)

Anexo N°2: Factores de planta de la cartera de proyectos eólicos

Figura 15.

Distribución del factor de planta de la cartera de proyectos eólicos en Chile



Fuente: Elaborado a partir de datos extraídos de Ministerio de Energía (2014).

Anexo N°3: Manejo de datos en el modelo de rendimiento hídrico anual

- Precipitación media anual

En la elaboración de la capa ráster de precipitación se utilizó el Conjunto de Datos Meteorológicos del Centro de Investigación sobre Clima y Resiliencia (o CR2MET, por sus siglas en inglés), que dispone de datos grillados cuya elaboración se basa en la construcción de productos espaciales distribuidos de precipitación diaria, que se encuentran cercanas a la superficie de Chile continental en una resolución de 0.05 grados de latitud-longitud, abarcando el periodo de 1960-2021 (Boisier, 2023).

Según lo recomendado por la Guía de Usuario de InVEST (Natural Capital Project, 2024) para este estudio se emplearon 10 años de datos de precipitación del CR2MET, abarcando desde 2012 hasta 2021. El procesamiento preliminar de estos datos se llevó a cabo en QGIS, donde, en primer lugar, se utilizó la calculadora ráster para sumar las bandas correspondientes a cada día del mes, obteniendo así la precipitación acumulada mensual para el periodo de estudio. Posteriormente, se calcularon los valores anuales sumando las precipitaciones mensuales de enero a diciembre para cada año, lo que permitió determinar la precipitación media anual a lo largo de los 10 años analizados. Luego, una vez obtenida la precipitación acumulada anual de cada uno de los 10 años, mediante la calculadora ráster, se aplicó un promedio aritmético simple sobre estos valores, permitiendo la estimación de la precipitación media anual del periodo de estudio. Una vez completado este proceso, los datos fueron cortados según los límites del área de estudio, y la capa resultante fue reproyectada y ajustada a una resolución espacial de 100 metros.

- Evapotranspiración de referencia

Para estimar la evapotranspiración de referencia, se utilizó la ecuación de Hargreaves modificada, propuesta por Droogers and Allen (2002):

$$ET_o = 0,0013 \times 0.408 \times RA \times (T_{av} + 17) \times (TD - 0,0123 \times P)^{0,76}$$

, donde RA representa la radiación extraterrestre, expresada en MJ/ m²d; T_{av} corresponde al promedio mensual de las temperaturas máximas y mínimas diarias, en °C; TD es la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas medias diarias de cada mes, también en °C; y P indica la precipitación media mensual, expresada en mm/mes.

- Radiación extraterrestre

La estimación de la radiación extraterrestre se realizó mediante una relación con la radiación solar, fórmula propuesta por Allen et al. (1998):

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) * RA$$

, donde R_s corresponde a la radiación solar o de onda corta, en MJ/ m²d; $a_s + b_s$ es la fracción de radiación extraterrestre que llega a la Tierra en días despejados (adimensional); n es la duración real de la luz solar en horas; y N corresponde a la duración máxima posible de luz solar en horas (Allen et al., 1998). A partir de la ecuación (8), RA puede ser estimado como:

$$RA = \frac{R_s}{\left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right)}$$

Los datos de R_s fueron obtenidos del conjunto de datos WorldClim versión 2.1, el cual reúne datos climáticos mundiales obtenidos mediante distintas interpolaciones (Fick & Hijmans, 2017). Los datos entregados por WorldClim, se encuentran en resolución mensual, teniendo doce meses de información en unidades de KJ/m²d. Para poder utilizar estos datos en la ecuación (9), fue necesario hacer una conversión de unidades hacia MJ/ m²d. Por otro lado, los parámetros a_s y b_s pueden asumir valores de 0.25 y 0.50 respectivamente, esto debido a la falta de datos puntuales de radiación solar (Allen et al., 1998). En cuanto a los valores de N , existen tablas con valores específicos según la latitud y mes del año, disponibles en Allen et al. (1998). Finalmente, se utilizaron datos diarios de horas de sol, disponibles en la Dirección Meteorológica de Chile (2025) para la estimación de n , los cuales fueron descargados al año 2020.

- Temperatura

Para la elaboración de las capas ráster de temperatura se utilizaron datos del CR2MET, un conjunto grillado que proporciona temperaturas mínimas y máximas diarias, que se encuentran cercanas a la superficie de Chile continental en una resolución de 0.05 grados de latitud-longitud, abarcando el periodo de 1960-2021 (Boisier, 2023).

Inicialmente, para la obtención tanto de temperaturas mínimas como temperaturas máximas, se utilizó la calculadora ráster de QGIS para promediar las bandas de cada mes del periodo de estudio. Luego, se obtuvo el promedio de todas las capas ráster correspondientes a un mismo mes (por ejemplo, todas las capas de enero) para generar capas de temperatura media mensual de cada uno de los doce meses del año. Finalmente, se ajustó su resolución espacial a 100 metros.

- Precipitación

Para la elaboración de las capas ráster de precipitación para la evapotranspiración de referencia, se emplearon datos de precipitación diaria del conjunto CR2MET. Dado que estos datos se encuentran en resolución diaria, el procesamiento preliminar de estos datos se realizó en QGIS, utilizando la calculadora ráster para sumar las bandas correspondientes a cada día del mes, con el objetivo de obtener la precipitación mensual acumulada. Posteriormente, se obtuvo el promedio de todas las capas ráster correspondientes a un mismo mes (por ejemplo, todas las capas de enero) para generar capas de precipitación media mensual de cada mes. Finalmente, se ajustó su resolución espacial a 100 metros.

- Uso/cobertura del suelo (LULC)

La capa ráster de usos de suelo se obtuvo a partir de MapBiomass Chile (2024), que es una iniciativa que realiza mapeos anuales respecto a la cobertura y usos de suelo en Chile continental. Los mapas ráster son producidos a partir de reclasificaciones de píxeles que provienen de imágenes del satélite Landsat a través de la plataforma Google Earth Engine (MapBiomass Chile, 2024). Los registros de usos de suelo de MapBiomass Chile cuentan con datos anuales desde el año 2000 al 2022.

Para obtener los usos de suelo predominantes durante el periodo de estudio, se descargaron los ráster correspondientes a cada uno de los años entre 2012 y 2021. Posteriormente, se aplicó la medida de tendencia central moda, con el objetivo de identificar, para cada píxel del territorio, el uso de suelo más frecuente a lo largo del periodo analizado, para posteriormente delimitar el ráster resultante al área de estudio con una resolución de 100 metros.

- Contenido de agua disponible para la planta (PAWC)

En Chile, no existen mediciones nacionales de este parámetro, por lo que (Natural Capital Project, 2024) recomienda el uso de un conjunto de datos global disponibles en el ISRIC. Este conjunto de datos, denominado “SoilGrids 250m 2017: Capacidad de agua disponible en el suelo derivada (fracción volumétrica) hasta el punto de marchitamiento” (Hengl et al., 2017), proporciona información sobre el contenido volumétrico de agua disponible en la planta (AWC). Dado que los valores de los ráster se expresan en porcentajes, se requirió un preprocesamiento para utilizarlos como insumo en el modelo de rendimiento hídrico anual de InVEST.

SoilGrids 2017 proporciona capas de AWC para siete intervalos de profundidad, los cuales fueron combinados en una sola capa para su correcto uso (Natural Capital Project, 2024). Hengl et al.

(2017) recomienda trabajar las capas a partir de una media ponderada de las predicciones dentro del intervalo de profundidad mediante la integración numérica, particularmente se utilizó la regla trapezoidal:

$$\left(\frac{1}{(b-a)}\right)\left(\frac{1}{2}\right)\sum_{k=1}^{N-1}(x_{k+1}-x_k)(f(x_k)+f(x_{k+1}))$$

, donde N es el número de profundidades, x_k es la profundidad k-ésima y $f(x_k)$ es el valor de la variable objetivo (o profundidad del suelo) en la profundidad x_k .

Para generar una capa combinada de AWC, en primer lugar, cada ráster fue cortado al área de estudio. Luego, cada ráster fue sustituido en la ecuación (10), obteniendo como resultado una capa espacial con valores entre 0 y 100, los cuales representan valores porcentuales. Finalmente, tal como lo requiere el modelo INVEST, estos valores fueron expresados en forma de fracción utilizando la calculadora ráster de QGIS, obteniendo así la capa ráster de PAWC con valores entre 0 y 1.

- Tabla biofísica.

Tabla 18.

Metodología de obtención de columnas de la tabla biofísica.

| Columna | Descripción |
|------------|--|
| lucode | Se utilizaron los mismos valores de los usos de suelo disponibles en MapBiomas Chile (2024). |
| lulc_veg | Indica la presencia de vegetación (valor 1) o la presencia de otras clases como humedales y zonas urbanas (valor 0). |
| Root_depth | Para asignar un valor representativo a cada clase, se realizó una revisión bibliográfica enfocada en identificar la profundidad de enraizamiento de la vegetación predominante en cada tipo de cobertura. A partir de esta información, se calculó el promedio de las profundidades encontradas, con el fin de definir un valor único y representativo para cada uso de suelo. Para las columnas con lulc_veg=0, se asignó un valor de -1 (Natural Capital Project, 2024). |
| Kc | Se obtuvo identificando la vegetación predominante en cada uso de suelo. Fue estimado con la calculadora Kc disponible en Natural Capital Project (2024), con datos disponibles en Allan et al. (1998) Una vez obtenidos los valores por |

| Columna | Descripción |
|---------|--|
| | vegetación, estos fueron promediados para su uso de suelo correspondiente. En la Tabla N°18 se detallan los Kc_{ini} , Kc_{mid} y Kc_{fin} . |

Tabla 19.

Usos de suelo por tipo de vegetación y coeficiente de cultivo.

| Uso de suelo | Tipo de vegetación | Kc ini | Kc mid | Kc fin | Observación | Fuente |
|---------------------|--------------------|--------|--------|--------|--|----------------------------|
| Agricultura | Cebada | 0.40 | 1.15 | 0.33 | Se obtuvieron los cultivos más representativos del área de estudio | Allan et al. (1998) |
| | Poroto | 0.50 | 0.86 | 0.85 | | |
| | Maíz grano | 0.45 | 1.20 | 0.48 | | |
| | Papa | 0.38 | 1.00 | 0.74 | | |
| | Trigo | 0.64 | 1.06 | 0.64 | | |
| | Remolacha | 0.35 | 1.20 | 0.70 | | |
| | Maravilla | 0.35 | 1.15 | 0.35 | | |
| | Raps | 0.35 | 1.15 | 0.35 | | |
| | Tabaco | 0.15 | 0.35 | 0.45 | | |
| | Arándano | 0.21 | 0.49 | 0.36 | | |
| | Avellano europeo | 0.50 | 1.10 | 0.65 | | |
| | Castaño | 0.50 | 1.10 | 0.65 | | |
| | Cerezo | 0.48 | 1.03 | 0.78 | | |
| | Frambuesa | 0.30 | 1.05 | 0.50 | | |
| | Kiwi | 0.40 | 1.05 | 1.05 | | |
| Humedales | Humedal | 1.20 | 1.20 | 1.20 | | |
| | Manzano rojo | 0.48 | 1.08 | 0.83 | | |
| Área sin vegetación | Suelo desnudo | 0.50 | 0.50 | 0.50 | | |
| Matorrales | Arbustos | 0.35 | 0.85 | 0.83 | | |
| | Alfalfa/Trébol | 0.40 | 0.95 | 0.90 | | |
| Pastizal | Pastos de Pastoreo | 0.30 | 0.75 | 0.75 | | Allan et al. (1998) |
| Hielo y nieve | Nieve | - | - | - | | |
| Río, lago u océano | Aguas abiertas | - | - | - | | |
| Afloramiento rocoso | Suelo desnudo | 0.50 | 0.50 | 0.50 | | |
| Arena, playa y duna | Suelo desnudo | 0.50 | 0.50 | 0.50 | | |
| Bosque | - | - | - | - | Se asume que los bosques evapotranspiran un 20% más que los matorrales | Varcoe and Sterling (2017) |
| Plantación forestal | Eucaliptus sp. | 1.20 | 1.20 | 0.50 | | |
| | Pino radiata | 1.00 | 1.00 | 1.00 | | |
| Infraestructura | - | - | - | - | f=0.5* | Kuang et al. (2021) |

*Para infraestructura, se utilizó la fórmula recomendada por Natural Capital Project (2024):

$$K_c = f * 0.1 + (1 - f) * 0.6$$

, donde f corresponde a la fracción de área impermeable (Kuang et al., 2021).