



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE RECURSOS NATURALES

INDICADORES MODIS PARA FORMACIONES VEGETALES DE LENGUA

***(Nothofagus pumilio)* EN LA PATAGONIA CHILENA**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de
Concepción para otorgar al título profesional de Ingeniero en Conservación de
Recursos Naturales

POR: Juan Javier García Ramírez

Profesor Guía: David Germán González Lanteri

Marzo, 2024

Concepción, Chile

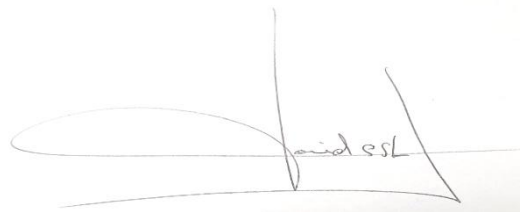
© 2024, Juan Javier García Ramírez

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

INDICADORES MODIS PARA FORMACIONES VEGETALES DE LENGUA

(*Nothofagus pumilio*) EN LA PATAGONIA CHILENA

Profesor Guía

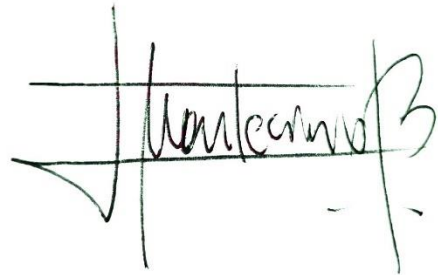


David Germán González Lanteri

Profesor Asociado

Ingeniero Forestal, PhD

Profesor Guía



Francisco Ignacio Montecino Bustos

Colaborador externo

Ing. en Conservación de Recursos Naturales

DEDICATORIA

A mi madre por hacer esto posible.

AGRADECIMIENTOS

A mi círculo más cercano que de diferentes maneras dieron el apoyo y contención emocional necesaria para realizar esta tarea.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Análisis Satelital de Bosque de Lengua en la Patagonia.....	2
1.2 Objetivos.....	9
1.2.1 General.....	9
1.2.2 Específicos.....	9
II. METODOLOGÍA.....	10
2.1 Descripción del Área de Estudio.....	10
2.2 Recopilación de datos.....	13
2.3 Selección de parámetros eco-biofísicos.....	16
2.3.1 Temperatura de Superficie terrestre (LST).....	16
2.3.2 Evapotranspiración (ET).....	17
2.3.3 Índice de Área Foliar (LAI).....	18
2.3.4 Fracción de Radiación fotosintéticamente Activa (FPAR)....	18
2.4 Procesamiento de Datos y Generación de Gráficos.....	19
2.5 Análisis de datos.....	21
2.6 Validación de productos MODIS.....	22
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
3.1 Evapotranspiración compuesta (ET) ($\text{kg}/\text{m}^2/8\text{días}$) versus Índice de área foliar (LAI) (m^2/m^2)	25
3.2. Evapotranspiración compuesta (ET) ($\text{kg}/\text{m}^2/8\text{días}$) versus Fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) (%)......	28
3.3. Evapotranspiración compuesta (ET) ($\text{kg}/\text{m}^2/8\text{días}$) versus Temperatura de la Superficie Terrestre Dia (LST Dia) ($^{\circ}\text{C}$)......	32
3.4. Evapotranspiración compuesta (ET) ($\text{kg}/\text{m}^2/8\text{días}$) versus Temperatura de la Superficie Terrestre Noche (LST Noche) ($^{\circ}\text{C}$)......	35
3.5. Índice de Área Foliar (LAI) versus Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR).....	39
3.6. Índice de Área Foliar (LAI) versus Temperatura de la Superficie Terrestre Dia (LST Dia) ($^{\circ}\text{C}$)......	43

3.7. Índice de Área Foliar (LAI) versus Temperatura de la Superficie Terrestre Noche (LST Noche).....	46
3.8. Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) versus Temperatura de la Superficie Terrestre Dia (LST Dia) (°C).....	48
3.9. Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) versus Temperatura de la Superficie Terrestre Noche (LST Noche).....	52
IV. CONCLUSIONES	55
V. GLOSARIO	57
VI. BIBLIOGRAFÍA	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Sitios de estudio, luego del proceso de filtrado.	15
Tabla 2.1: Continuación.....	16

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Area de estudio, Región de Aysén.....	12
Figura 2. Gráfico correspondiente a Evapotranspiración compuesta (ET) (kg/m ² /8días) y el Índice de Área Foliar (LAI) de todos los sitios de estudio durante el periodo de 5 años (2018 a 2022).....	26
Figura 3. Gráfico correspondiente a la Evapotranspiración compuesta (ET) (kg/m ² /8días) y la Fracción de Absorción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) de todos los sitios de estudio durante el periodo de 5 años (2018 a 2022).....	29
Figura 4. Gráfico correspondiente a la relación entre la Evapotranspiración compuesta (ET) (kg/m ² /8días) y la Temperatura de Superficie Terrestre durante el día (LST Día) de todos los sitios de estudio durante el periodo de 5 años (2018 a 2022).....	33
Figura 5. Gráfico correspondiente a la relación entre la Evapotranspiración compuesta (ET) (kg/m ² /8días) y la Temperatura de Superficie Terrestre durante la Noche (LST Noche) de todos los sitios de estudio durante el periodo de 5 años (2018 a 2022).....	37
Figura 6. Gráfico correspondiente a el Índice de Área Foliar (LAI) (m ² /m ²) y la Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) (%) de todos los sitios de estudio durante el periodo de 5 años (2018 a 2022).....	40
Figura 7. Gráfico correspondiente al Índice de Área Foliar (LAI) (m ² /m ²) y la Temperatura de Superficie Terrestre durante el día (LST Día) (°C) de todos los sitios de estudio durante el periodo de 5 años (2018 a 2022).....	44
Figura 8. Gráfico correspondiente al Índice de Área Foliar (LAI) (m ² /m ²) y la Temperatura de Superficie Terrestre durante la Noche (LST Noche) (°C) de todos los sitios de estudio durante el periodo de 5 años (2018 a 2022).....	47
Figura 9. Gráfico correspondiente a Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) (%) y la Temperatura de Superficie Terrestre durante el día (LST Día) (°C) de todos los sitios de estudio durante el periodo de 5 años (2018 a 2022).....	50
Figura 10. Gráfico correspondiente a la Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) (%) versus Temperatura de la Superficie Terrestre Noche (LST Noche) (°C) de todos los sitios de estudio durante el periodo de 5 años (2018 a 2022).....	53

RESUMEN

Este estudio se centró en analizar la dinámica ecológica del ecosistema de lenga (*Nothofagus pumilio*) en la región de Aysén durante un período de cinco años (2018-2022), utilizando el análisis de productos MODIS. Se investigaron las relaciones entre variables claves, como la Evapotranspiración (ET), el Índice de Área Foliar (LAI), la Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) y Temperatura de Superficie Terrestre (LST) tanto diurna como nocturna. Para modelar estas relaciones, se aplicaron funciones cúbicas, cuadráticas y lineales, seleccionando aquellas en función de su desempeño estadístico y validez probada. Los resultados resaltaron la influencia significativa de la estacionalidad, la cual está vinculada al ciclo de vida de la lenga, una especie caducifolia, esto afecta las mediciones de todas las variables estudiadas, así como los cambios de temperatura a lo largo del año. Se observó que la evapotranspiración desempeña un papel crucial al regular la temperatura superficial y al modular las complejas interacciones entre las variables. Las conclusiones de este estudio se enfatizaron en la importancia de considerar la variabilidad estacional y la influencia de la evapotranspiración. También se destacó la necesidad de utilizar modelos estadísticos que se ajusten de manera más precisa a la realidad como herramientas metodológicas sólidas. Este estudio contribuye al entendimiento de la dinámica ecológica en ecosistemas de bosques de lenga y proporciona una

base sólida para la toma de decisiones en la gestión de los recursos naturales relacionados con la lenga en la región de Aysén.

ABSTRACT

This study delves into the ecological dynamics of the lenga ecosystem (*Nothofagus pumilio*) within the Aysén region, spanning a five-year period from 2018 to 2022, utilizing an analysis of MODIS products. It explores the intricate relationships among key variables, including Evapotranspiration (ET), Leaf Area Index (LAI), Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR), and diurnal and nocturnal Land Surface Temperatures (LST). To model these relationships, we employed cubic, quadratic, and linear functions, meticulously chosen based on their statistical robustness and adherence to rigorous validity tests. Our findings clarified the substantial impact of seasonality, intimately tied to the deciduous life cycle of the lenga tree, on the measurements of all the studied variables, alongside the year-round temperature fluctuations. The pivotal role of evapotranspiration as a regulatory force governing surface temperature and orchestrating intricate interactions among these variables is a key highlight of our results. Our conclusions underscore the imperative of accounting for seasonal variations and the omnipresent influence of evapotranspiration. Moreover, they emphasize the adoption of statistical models that faithfully mirror real-world complexities, serving as dependable methodological tools. In sum, this study enriches our comprehension of ecological dynamics within analogous ecosystems and furnishes a solid foundation for informed decision-making in the

stewardship of natural resources associated with the lenga ecosystem in the Aysén region.

I. INTRODUCCIÓN

La presente investigación se sitúa en el contexto del análisis satelital aplicado al estudio de los bosques de lenga (*Nothofagus pumilio*) en la Patagonia chilena. Su propósito es comprender la dinámica de estos ecosistemas cruciales, así como evaluar su respuesta ante los cambios ambientales y climáticos en curso. Este estudio tiene una relevancia desde el punto de vista científico como para la gestión y conservación de la biodiversidad en la región.

En la actualidad el análisis satelital se ha convertido en una herramienta importante para comprender y monitorear los ecosistemas terrestres y sus procesos a escala global. La capacidad de los satélites para recopilar datos continuos y sistemáticos sobre la superficie terrestre ha cambiado la comprensión de la dinámica de los bosques, permitiendo observar cambios a lo largo del tiempo, en una amplia variedad de condiciones ambientales y superficies. Este enfoque de monitoreo remoto ofrece una oportunidad para estudiar la distribución, composición y salud de los bosques, inclusive en lugares de difícil acceso, así como para evaluar los impactos del cambio climático y la actividad humana en estos ecosistemas a diferentes escalas temporales y espaciales.

En esta investigación, se enfocará en variables eco-biofísicas clave, tales como el Índice de Área Foliar (LAI), la Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR), la Temperatura de Superficie Terrestre (LST) y la Evapotranspiración Compuesta (ET). Estas variables proporcionan información fundamental sobre la salud y dinámica de los bosques, permitiendo observar sus cambios en el tiempo y en la superficie. Así es también en el objeto de este estudio la lenga, permitiendo evaluar su estado y anticipar su respuesta ante los cambios ambientales.

Es importante destacar que el uso de datos satelitales presenta ciertas limitaciones, como la resolución espacial y la presencia de nubes en las imágenes. Sin embargo, estas limitaciones pueden ser mitigadas mediante técnicas de procesamiento de datos y análisis estadístico adecuadas, lo que nos permite obtener resultados precisos y confiables.

1.1. Análisis Satelital de Bosque de Lenga en la Patagonia

Nothofagus pumilio, conocido como lenga, es una especie que se extiende desde la región del Maule hasta Tierra del Fuego en Magallanes, tanto en la cordillera de la costa como en la cordillera de los Andes, desde el nivel del mar hasta aproximadamente los 2.000 metros de altitud (Premoli, A. (2004)). Esta amplia distribución geográfica le permite adaptarse a condiciones climáticas extremas,

incluyendo ecosistemas montañosos y subantárticos. La lenga desempeña un papel fundamental en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas en los que se encuentra, convirtiéndola en un objeto de estudio relevante para comprender la dinámica de los bosques y el impacto del cambio climático en estos ecosistemas.

Los bosques de *N. Pumilio* son hábitats cruciales para especies amenazadas, como el huemul y el cóndor andino. Además, desempeñan un papel esencial en la conservación de suelos, la regulación del clima y la gestión del ciclo del agua. Este estudio se enfoca en la obtención de información detallada sobre diversas variables eco-biofísicas presentes en los bosques de lenga en la Patagonia chilena para evaluar el estado y comportamiento de esta especie en distintas temporadas del año. Dado lo complejo y costoso que sería recopilar estos datos de manera in situ, el uso de herramientas satelitales validadas se presenta como una eficaz opción y de menor costo.

En este contexto, se emplean productos derivados de las imágenes satelitales MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), recopilados por los satélites Terra y Aqua del programa MODIS de la NASA. Estos datos proporcionan información valiosa y continua a nivel global, permitiendo establecer un marco de referencia para evaluar el estado de la lenga y los posibles efectos del cambio climático, esto en un período de cinco años, desde el 2018 al 2022, con mediciones cada 8 días. Esto sería difícil de lograr de

manera convencional debido a las limitaciones físicas, económicas y al acceso para la toma de datos in situ.

El propósito de este estudio es contribuir al conocimiento científico y a la conservación de los bosques de lenga. Comprender cómo responde esta especie a los cambios ambientales de cada estación del año nos permitirá evaluar su estado de conservación y anticipar su respuesta ante los cambios climáticos en curso. Para lograrlo, nos enfocamos en productos MODIS específicos, como el Índice de Área Foliar (LAI, por sus siglas en inglés), la Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR), la Temperatura de Superficie Terrestre (LST) y la Evapotranspiración Compuesta (ET). Estos indicadores nos brindarán una visión integral del estado de la lenga en una amplia región geográfica. El uso de estos productos está validado por estudios que no solo demuestran su correlación con mediciones in situ, sino también que a medida que pasa el tiempo los algoritmos que proporcionan estos productos son cada vez son más precisos, como señala el estudio realizado por Serbin, S., et al. (2013) enfocado el fracción de radiación fotosintéticamente activa donde se encuentra que los resultados revelan una conexión significativa entre las recuperaciones de MODIS C5 y las mediciones in situ de FPAR, siendo más fuerte en áreas con mayor FPAR. En general, la versión C5 demuestra una mejora sustancial en la concordancia con las mediciones in situ en comparación con la versión anterior C4, destacando la utilidad mejorada de los productos MODIS en diversas condiciones y etapas de sucesión del bosque. Se señala la mejora del rendimiento de una nueva versión

del algoritmo, en este caso del paso de la colección 4 (C4) a la colección 5 (C5). Para la realización de este estudio se utilizó un algoritmo más reciente, correspondiente a la colección 6 (C6) que ya se encuentra en etapas avanzadas de validación, esto quiere decir que se han corregido errores de las colecciones anteriores, mejorando la calibración de los sensores MODIS, dando como resultado datos como mayor correlación con la realidad. Esta complejidad de procesamiento de datos se debe al gran número de variables que influyen para la toma de datos, como es caso de la temperatura de superficie terrestre, según Aguilar-Lomea, J., et al. (2019) señala que existen muchos factores que pueden influir en la compleja relación entre la temperatura superficial terrestre diurna y la temperatura máxima del aire, como la radiación solar, la cobertura de nubes, la humedad del suelo y la rugosidad de la superficie, además se debe considerar en el caso del LST que se toman datos tanto de día como de noche y por dos satélites, el Aqua y el Terra, en el estudio llevado a cabo por Xing et al. (2021), se menciona que las estimaciones diarias de LST a partir de datos MODIS fueron comparadas con mediciones in situ en siete sitios SURFRAD (Surface Radiation Budget Network) en 2018. Según los resultados de validación, se encontró que la precisión de la LST diurna de Aqua es similar a la de Terra, con errores cuadráticos medios de 3.88 K y 3.52 K, respectivamente, y sesgos de 0.94 K y -0.68 K, respectivamente. En cuanto a la LST nocturna de Terra y Aqua, los errores cuadráticos medios son de 3.16 K y 2.95 K, respectivamente, con sesgos

de 0.35 K y 0.58 K, respectivamente. Estos errores y sesgos pueden deberse a problemas de escala y errores en la recuperación de la LST.

Son muchas las variables que se entrecruzan para obtener un resultado para cada una de las variables y quizás una de las más complejas es la Evapotranspiración, que en este caso se trata de un producto compuesto por información entregada cada 8 días, donde el tipo de ecosistema juega un papel crucial en la precisión de estos resultados, como menciona Qiao et al., (2022) encontró que los productos MODIS proporcionaron una ligera sobreestimación de la ET (~5%) para el sitio subhúmedo esto en comparación con las mediciones obtenidas in situ a través de torres de flujo de calor latente, que es una medición directa de la ET a nivel local, esto dentro del contexto de pradera de pasto alto en la región subhúmeda de las grandes llanuras del sur, en contraste del rendimiento de una región semi árida donde hubo una subestimación de la ET en más de un 40 %. Para los productos de FPAR y LAI, ocurre una situación similar uno de los factores que influye en su medición es la edad de los bosques, como menciona Serbin, S., et al (2013) la relación entre la variabilidad estacional de FPAR y LAI in situ y la edad del bosque es fuerte, destacando una mayor estacionalidad en áreas más jóvenes y en sucesión temprana. Además, la estacionalidad capturada por MODIS muestra una correlación positiva con la edad del bosque, siendo más marcada en sitios en sucesión temprana y disminuyendo en áreas más antiguas dominadas por coníferas.

Posteriormente, tomando estas consideraciones, se llevó a cabo un análisis detallado de cómo se comportan estas variables entre ellas, generando gráficos comparativos que ilustran las relaciones y patrones entre estas variables claves. Donde se observan tendencias y correlaciones entre ellas, como queda en evidencia en estudios previos, donde se obtuvo conocimiento de correlaciones entre las variables LAI y ET, donde un mayor follaje verde se traduce en mayor superficie foliar disponible para generar fotosíntesis y, por lo tanto, en un mayor intercambio de gases con la atmósfera, estos resultados se han documentado en investigaciones, como el estudio de Morisette et al. (2001), que respalda esta correlación. En el caso de la lenga, se espera encontrar resultados similares. Este estudio nos brinda una comprensión más profunda del comportamiento de la especie a lo largo de las estaciones del año y cómo responde a los cambios ambientales y climáticos. Dado su potencial de resistencia a condiciones climáticas extremas, es de vital importancia entender si los cambios actuales causados por la actividad humana han afectado o están afectando esta capacidad.

Es importante, sin embargo, tener en cuenta las limitaciones del uso de datos de productos MODIS, siendo una de las principales la resolución espacial, (de 500 y 1000 metros). Esta limitación puede no capturar detalles como pequeños parches vegetales o cambios específicos en ciertas zonas de los bosques de lenga. Por lo tanto, la selección adecuada de los sitios de estudio es esencial.

Además, la cobertura de nubes puede afectar la toma de datos por parte de los sensores MODIS, por lo cual se utilizan productos compuestos, libres de nubes, ya que como se menciona en estudios anteriores como el de Fang, H., et al. (2012) Donde se encontró que los productos MODIS C5 muestran cierta discontinuidad temporal y una variabilidad irreal en verano, especialmente para los biomas forestales, esto se debe en parte al impacto de la cobertura de nubes, por lo cual es un factor para considerar.

La novedad de este trabajo radica en la aplicación de técnicas de análisis satelital para el estudio de los bosques de lenga, así como en la generación de información relevante para la evaluación de la salud de este ecosistema, para la conservación y manejo de estos. Los resultados de esta investigación contribuyen al conocimiento científico y servirán de base para la toma de decisiones informadas en materia de gestión territorial, abriendo la puerta para la futura generación de líneas base para estado de la lenga en diferentes condiciones ambientales, pudiendo generar comparativas con bosques de lenga en distintos lugares y como se van diferenciando según las condiciones en que se encuentra, lo que puede ayudar al correcto manejo de estos bosques.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Analizar la dinámica ecológica del ecosistema de lenga (*Nothofagus pumilio*) en la región de Aysén durante un período de cinco años (2018-2022), empleando productos compuestos de la plataforma MODIS.

1.2.2 Específicos

Los objetivos específicos de este estudio son:

- i- Obtener y procesar datos MODIS (LST, LAI, FPAR, ET) para la especie lenga en la región de Aysén en la Patagonia chilena.
- ii- Se busca comprender las interacciones entre variables como la ET, LAI, FPAR y LST tanto diurnas como nocturnas, en diferentes estaciones del año.
- iii- Realizar análisis estadísticos con el fin de evaluar las correlaciones existentes entre las variables estudiadas (ET, LAI, FPAR, LST).
- iv- Interpretar las relaciones encontradas a nivel biológico, ambiental y temporal, con el objetivo de proporcionar una comprensión más profunda de la dinámica de la especie de lenga y su entorno.

II. METODOLOGÍA

2.1 Descripción del Área de Estudio

El área de estudio abarca varios puntos en la Región de Aysén, ubicada en la Patagonia chilena (Figura 1). Esta región tiene una extensión de 108.494,4 km² y se extiende desde el paralelo 43°38' al norte hasta los 49°16' al sur, y desde el meridiano 71°06' al oeste hasta las aguas del Océano Pacífico, representando aproximadamente el 14,3 % del territorio nacional.

La Patagonia chilena, como es mencionado por Hepp, C. et al. (2018), se caracteriza por tener climas templados húmedos y fríos, con una cantidad significativamente mayor de precipitaciones en comparación con la región oriental, especialmente en la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes. Por esta razón, también se le conoce como "Patagonia Húmeda" o "Patagonia Occidental". Sin embargo, en algunas áreas orientales de Aysén, se pueden encontrar regiones más secas, donde predominan las estepas con pastizales de coirón y ecosistemas arbustivos xerofíticos (Hepp, C. et al. (2018)).

Según Hepp, C. et al. (2014), se pueden identificar cuatro amplias zonas agroclimáticas en Aysén, junto con una zona de microclima que se restringe a pequeñas áreas cerca de los grandes lagos. Estas zonas son las siguientes:

Zona Litoral o Insular: Caracterizada por un clima litoral templado y húmedo con precipitaciones intensas que superan los 3.000 mm anuales, con variaciones de temperatura más suaves.

Zona Húmeda: Predomina el clima templado húmedo costero con altas precipitaciones, como en Puerto Aysén con 2.640 mm anuales, y temperaturas medias anuales alrededor de 9°C.

Zona Intermedia: Situada en la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes, presenta climas variados según la altitud, desde andino boreal hasta templado húmedo intermedio.

Zona de Estepa: En sectores orientales, con un clima de estepa fría, destacando áreas más elevadas con bosque de ñirre y condiciones transicionales hacia climas más fríos.

Zona de Microclima: Limitada a áreas semiáridas de estepa o matorral xerofítico cerca de lagos, con un clima templado seco estival y bajos niveles de precipitación.

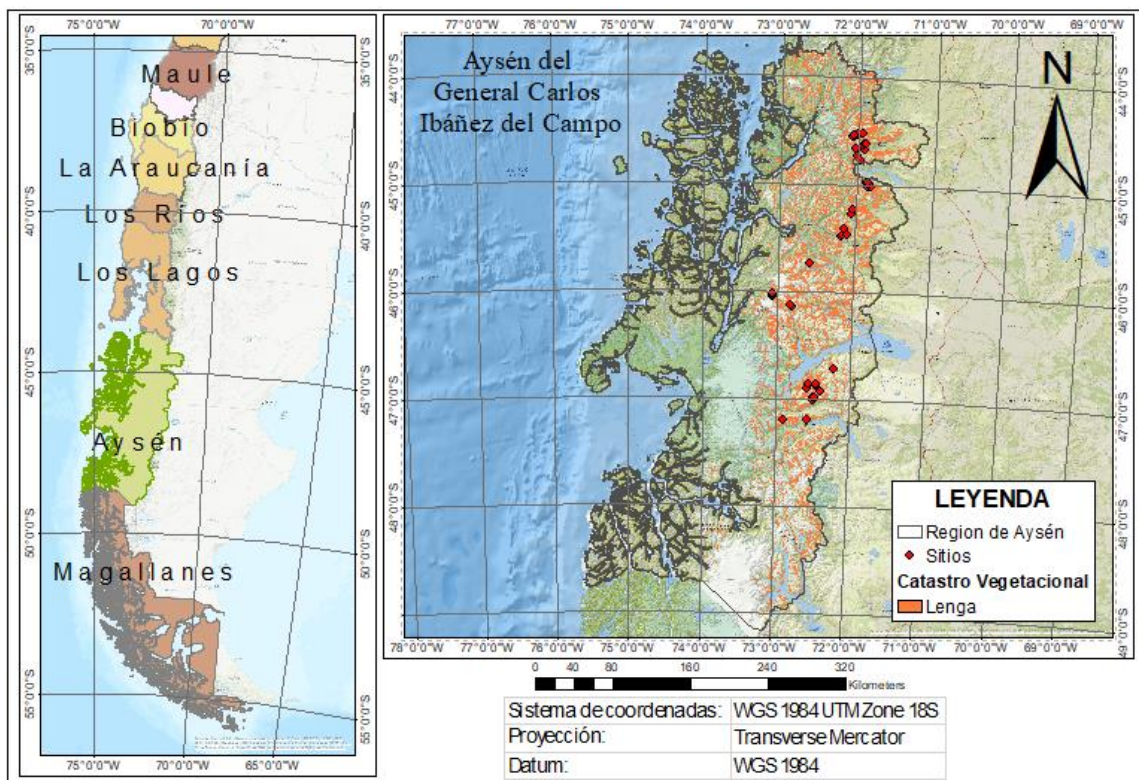


Figura 1. Área de estudio y puntos de muestreo en la región de Aysén.

2.2 Recopilación de datos

Se recolectaron datos de productos MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) de cada sitio seleccionado (Figura 1), ya que inicialmente se trabajó con datos de 51 puntos de muestreo distribuidos en la región de Aysén, con una resolución espacial de 500 metros para evaluar el comportamiento de productos MODIS de formaciones de lenga a lo largo del tiempo. Se utilizaron productos compuestos con frecuencia de 8 días desde 1.1.2018 hasta 31.12.2022. Se trabajó con imágenes de 500 metros de resolución espacial para los productos de ET, FPAR y LAI, y de 1000 metros para el LST. Luego de definir los puntos de estudio, recopilamos la información satelital histórica correspondiente, y a continuación, filtramos los datos según su calidad, realizando un análisis lógico de secuencias de comportamiento para asegurarnos de que los valores de cada variable se ajusten a la realidad de la especie estudiada.

Es importante señalar que la resolución de estos productos podría afectar la precisión de los datos, ya que abarcan no solo la cobertura vegetal de lenga, sino también otros elementos como quebradas, áreas sin cobertura, y otras especies vegetales. Para abordar esta cuestión, la selección se realizó sobre planos del proyecto “Catastro de los Recursos Vegetacionales y Usos de la tierra, actualización año 2011” realizado por la Corporación Nacional Forestal (CONAF)

con puntos que abarcaban al menos 500 metros cuadrados de cobertura de lenga. Además, se utilizaron imágenes satelitales Landsat del mapa de base World Imagery en ArcGIS para hacer un análisis más riguroso de las zonas potenciales de muestreo debido a que tiene una mayor resolución espacial (30 metros) evitando elementos no deseados como otras especies, quebradas y zonas sin interés. La selección de estos puntos se realizó en toda la Región de Aysén para abarcar la mayor superficie posible, como se muestra en la Figura 1.

Respecto al producto LST, debido a que se trata de una variable de temperatura, se considera que su resolución de 1000 metros no afectaría significativamente la variabilidad de las mediciones.

Posteriormente, se aplicó un segundo filtro a los datos MODIS recopilados en cada uno de estos puntos, donde finalmente quedan un total de 35 de los 51 puntos originales.

Se incluyeron los productos Índice de Área Foliar (LAI), la Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR), ambos provisto por el MCD15A2H versión 6.1, el de Temperatura de superficie terrestre, (LST) provisto por MOD11A2 Versión 6.1, La Evapotranspiración compuesta (ET) provista por MO16A2 versión 6.1. Luego, se realizó un tercer filtro en función de la idoneidad de los datos, descartando puntos con valores anómalos que no correspondían a las

condiciones normales de la zona de estudio o de la temporada del año. Estas anomalías podrían deberse a errores en la recuperación de los productos, como la presencia de alguna proporción de nubes en los productos compuestos que podría afectar las mediciones como lo mencionan los estudios de validación de productos MODIS (Xing, Z. et al (2021), Fang, H. et al (2012)). Este proceso redujo la muestra a 24 puntos finales, con los cuales se realizó el análisis de la dinámica del comportamiento de las variables sobre las coberturas de lenga en la región de Aysén estos sitios se especifican en la Tabla 2.1, presentada a continuación.

Tabla 2.1. Coordenadas (UTM WGS 84) sitios de estudio, luego del proceso de filtrado.

Punto	Sitio	Coordenada E (metros)	Coordenada N (metros)
1	6	684656	4802441
2	10	693656	4806941
3	11	711656	4822441
4	12	668656	4886941
5	16	651156	4898941
6	20	687656	4931441
7	22	721656	4960941
8	23	726156	4961441
9	26	732156	4986941
10	28	732656	4987441
11	31	733156	5064941
12	32	733656	5064941
13	33	734156	5064941
14	34	684656	4769941
15	35	747656	5009941
16	36	748156	5009941

Tabla 2.1 continua en la página 17.

Tabla 2.1: Continuación.

Punto	Sitio	Coordenada E (metros)	Coordenada N (metros)
17	37	750656	5010941
18	38	749656	5012941
19	40	747156	5014941
20	43	744656	5049441
21	44	745156	5049441
22	46	742656	5054441
23	49	738156	5063941
24	51	742656	5065941

2.3. Selección de parámetros eco-biofísicos

Los productos MODIS utilizados en este estudio incluyeron variables eco-fisiológicas que resultaron fundamentales para establecer los parámetros del estado de la especie y su ecosistema. La selección de estos parámetros fue crucial para obtener información relevante que respaldara el análisis y la toma de decisiones. Se seleccionaron las siguientes variables:

2.3.1 Temperatura de Superficie Terrestre (LST): Es una medida de la temperatura promedio de la superficie terrestre por píxel para periodos compuestos de 8 días, con una resolución espacial de 1 kilómetro (km). Esta medida se obtiene mediante la detección de la radiación térmica emitida por la superficie de la Tierra en la banda térmica infrarroja del espectro electromagnético. Posteriormente, se procesa mediante algoritmos que

consideran factores como la emisividad de la superficie terrestre, la atmósfera y la topografía para calcular la temperatura en grados Celsius. La elección de este producto se fundamentó en su capacidad para proporcionar información sobre las condiciones de la lenga y su relación con otras variables como la ET, LAI y FPAR.

La validación de este producto MODIS se basó en estudios científicos que demostraron su precisión y confiabilidad en diversas condiciones climáticas y ecosistemas.

2.3.2 Evapotranspiración Compuesta (ET): Es el proceso que combina la transpiración del dosel, la evaporación del dosel y la evaporación del suelo (Wang, S. et al., 2015) obtenida una sola vez desde 8 días consecutivos de toma de datos desde uno de los satélites de la plataforma MODIS en donde el valor de ET sea de alta calidad. Este producto se basa en el algoritmo de la ecuación de Penman-Monteith (Mu, Q., et al., 2007) y utiliza datos meteorológicos y otros productos MODIS para calcular la cantidad de agua que se evapora y se transpira en una región o zona determinada.

Este dato fue fundamental para comprender cómo la lenga interactúa con el ambiente y se adapta a las condiciones climáticas, además de detectar posibles situaciones de estrés hídrico.

2.3.3. Índice de Área Foliar (LAI): El Índice de Área Foliar (LAI) mide la superficie de hojas verdes de un solo lado la hoja y el área terrestre proyectada correspondiente, se mide en unidades de metros cuadrados por metro cuadrado (m^2/m^2). (Wan, Z., et al., 2021). El producto MODIS MCD15A2H proporciona este índice con una colección de datos compuesto de 8 días y presenta una resolución de píxel de 500 metros. El LAI es un indicador crucial para evaluar la salud y el vigor de la vegetación, ya que representa la cantidad de follaje verde en una superficie específica. A mayor LAI, mayor es la cantidad de hojas disponibles para realizar la fotosíntesis, lo que implica un mayor intercambio de gases con la atmósfera y un mayor uso de agua por parte de las plantas. Este indicador es útil para identificar problemas de salud, estrés hídrico o disturbios en la lenga.

2.3.4. Fracción de la Radiación fotosintéticamente Activa (FPAR): La FPAR es la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el dosel vegetal, que representa la porción de la radiación solar entrante a la superficie terrestre entre las longitudes de onda 400 y 700 nm. Es un indicador crucial para evaluar la estabilidad de los bosques, así como la salud y el crecimiento de estos (Shestakova, T., et al., 2022). Este producto se compone de datos capturados en un rango de 8 días, con una resolución de píxel de 500 metros. Al igual que en el caso del LAI, el algoritmo elige el mejor dato de píxel disponible en los sensores MODIS de ambos satélites de la NASA, tanto Aqua como Terra, durante ese período de tiempo (Mynen, R., et al., 2021).

Se seleccionó este producto debido a que la cantidad de radiación fotosintéticamente activa recibida en una zona limita el máximo crecimiento de una planta, determinando su fotosíntesis. Considerando esto, se pueden identificar lugares con igual radiación, pero con diferencias en el crecimiento, y también cómo otras variables afectan al desarrollo.

Para todos estos productos MODIS se analizó la correlación que existe entre las variables, así ver el impacto que tienen cada una en las formaciones de lenga y como estas interactúan entre ellas. La validación de los productos previamente mencionados se basa en estudios que realizan comparaciones entre las mediciones realizadas a través de producto MODIS con mediciones in situ, demostrando su capacidad para representar la estacionalidad y la salud de la vegetación.

2.4. Procesamiento de Datos y Generación de Gráficos.

Para el análisis de los datos MODIS, se realizó un reordenamiento de estos en Microsoft Excel, donde se generó una planilla con columnas para cada dato entregado por MODIS, una vez realizado esto, se procedió a realizar el filtrados de datos, comenzando por descartar los sitios que tenían ausencias de años o meses en la data, de cualquiera de los productos LAI, FPAR, LST o ET, dado que se realizó una comparativa entre todas las variables, era necesario tener los

todos datos con las mismas fechas de toma, Tras este filtrado, se realizó el análisis de los datos, dando especial atención al LAI, que presenta un comportamiento estacional marcado. Se descartaron puntos con datos que no siguieran esta lógica estacional. Después de estos procesos, se obtuvo un conjunto de 24 puntos de estudio.

Se realizó un filtrado más detallado a nivel de fechas, identificando anomalías como por ejemplo valores de LAI que varían entre 0 y 7 (m^2/m^2), por lo tanto, cuando existían valores entre 7 a 4 (m^2/m^2) durante el invierno u otoño, o valores de 0 (m^2/m^2) en pleno verano entre dos datos con valores de LAI superiores a 4 (m^2/m^2). Estos casos se interpretaron como errores en la toma y procesamiento de datos. Después de este filtrado manual, se obtuvo una base de datos confiable y segura para el análisis.

Posteriormente, se generaron gráficos en el software Sigmaplot ver. 15, comparando cada variable mencionada (LST, ET, FPAR, LAI) entre sí. Se crearon 9 gráficos para cada uno de los 24 puntos, totalizando 216 gráficos. Estos gráficos incluyeron relaciones como ET vs LAI, ET vs FPAR, ET vs LST Día, ET vs LST Noche, LAI vs FPAR, LAI vs LST día, LAI vs LST Noche, FPAR vs LST Día y FPAR vs LST Noche. El objetivo era observar el comportamiento conjunto de cada variable frente a la otra durante un periodo de 5 años, desde 2018 hasta 2022, buscando correlaciones. Se aplicó un análisis de regresión no lineal a cada

comparación, asegurando que el algoritmo utilizado no proporcionara dos valores para un mismo punto y buscando ajustar la curva que mejor se desempeñara en términos estadísticos, específicamente el coeficiente de determinación R-cuadrado (r^2), ya que un valor más alto sugiere que el modelo de regresión se ajusta de buena manera a los datos, con el objetivo de explicar de manera óptima la variabilidad de los datos analizados.

2.5. Análisis de datos

Se realizó un análisis de correlación y regresión lineal y no lineal utilizando los conjuntos de datos de series temporales correspondientes a los diversos indicadores bajo estudio: LAI (Índice de Área Foliar), LST (Temperatura de Superficie Terrestre), ET (Evapotranspiración) y FPAR (Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa). El propósito principal de este análisis fue identificar y comprender las relaciones existentes entre estos indicadores y aplicar las técnicas estadísticas apropiadas.

Es importante destacar que se consideró la estacionalidad de las mediciones para contextualizar adecuadamente los datos obtenidos. Aunque los límites de cambio entre estaciones pueden parecer arbitrarios en algunos casos, se establecieron en función de las condiciones climáticas reales para asegurar una interpretación precisa de los resultados. Este análisis comparativo de variables

resulta fundamental para comprender el comportamiento de la lenga y su respuesta a las condiciones cambiantes a lo largo del tiempo.

2.6 Validación de productos MODIS

El uso de productos MODIS está validado por estudios científicos que respaldan su precisión y fiabilidad en la obtención de datos sobre variables clave como la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST), la Evapotranspiración (ET), el Índice de Área Foliar (LAI) y la Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR). Estas validaciones son fundamentales para garantizar la exactitud de los resultados obtenidos y su utilidad en la comprensión de la dinámica ecológica de los ecosistemas estudiados.

Temperatura de la Superficie Terrestre (LST): El producto LST de MODIS fue seleccionado por su capacidad para proporcionar información crucial sobre las condiciones de la lenga y su correlación con otras variables. Además, permite el análisis de patrones estacionales y correlaciones con la Evapotranspiración (ET), el Índice de Área Foliar (LAI) y la Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR), ofreciendo información sobre el estrés térmico y la adaptación de la especie. La validación del producto LST de MODIS se realizó a través de varios estudios científicos, como el Wan, Z. (2008) que reportó una alta precisión bajo condiciones de cielo despejado, con Desviación de la Raíz Cuadrada Media

(RMSD) generalmente por debajo de 0.7 K en comparación con mediciones in situ. Vancutsem, C. et al. (2010) destacaron las diferencias entre MODIS LST y la temperatura máxima del aire, que varían según la estación, los ecosistemas, la radiación solar y la cobertura de nubes. Xing et al. (2021) observaron una alta precisión en las estimaciones diarias de LST tanto de día como de noche. Li, H. et al. (2014) señalaron una ligera subestimación diurna en áreas desérticas debido al suelo desnudo. Estas validaciones confirman la fiabilidad de MODIS LST para este análisis.

Evapotranspiración Compuesta (ET): Este producto MODIS, integra datos meteorológicos y otros productos MODIS como LAI y FPAR, se emplean para estimar el consumo de agua por parte de las plantas. Raj, A. et al. (2022) enfatizaron la variación de la dinámica de la ET en diferentes regiones dentro de una misma área, dependiendo de las condiciones ambientales. Qiao, L. et al. (2022) validaron la ET de MODIS con mediciones in situ, mostrando una ligera sobreestimación en sitios subhúmedos y una subestimación sustancial en regiones semiáridas, destacando su utilidad en diferentes contextos ecológicos.

Índice de Área Foliar (LAI) y Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR): El producto MCD15A2H de MODIS que proporciona datos del LAI y de la FPAR, es una colección de datos compuestos de 8 días y presenta una resolución de pixel de 500 metros. El algoritmo elige el píxel más adecuado entre

las capturas de los satélites Terra y Aqua de la NASA durante este lapso. Es crucial para estimar el uso de agua por parte de las plantas y evaluar la salud de la vegetación. El LAI también se emplea para estimar otros parámetros eco-biofísicos vinculados al consumo de agua por parte de las plantas, como la ET (Raj, A., et al., 2022). Captura variaciones estacionales, mostrando valores aumentados durante la primavera y el verano, como lo observó Serbin, S. et al. (2013). La validación de los productos LAI y FPAR de MODIS por Fang, H. et al. (2012) y Yang, W. et al. (2006) informaron mejoras de la Colección 4 a la Colección 5, abordando problemas relacionados con la variabilidad de la reflectancia superficial, con la Colección 6 mostrando aún mayor correlación. Yan, K. et al. (2016) validó aún más la Colección 6, indicando una mayor precisión en comparación con la Colección 5, con el LAI alcanzando la validación de Etapa 2 y el FPAR alcanzando la validación de Etapa 1, mejorando así su fiabilidad.

Cabe mencionar que para la realización de esta memoria de título se emplearon productos MODIS de la colección 6, lo que garantiza aún más la fiabilidad de estos datos.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los principales resultados, donde se compara cada una de las variables ET vs LAI, ET vs FPAR, ET vs LST Día, ET vs LST Noche, LAI vs FPAR, LAI vs LST día, LAI vs LST Noche, FPAR vs LST Día y FPAR vs LST Noche, por un periodo de tiempo de cinco años, desde el 01/01/2018 al 31/12/2022, reuniendo la información de todos los sitios de estudio. Los datos individuales de cada sitio por separado junto con sus gráficos y datos estadísticos correspondientes, se presenta en los anexos.

3.1. Evapotranspiración compuesta (ET) ($\text{kg}/\text{m}^2/8\text{días}$) versus Índice de área foliar (LAI) (m^2/m^2)

Al realizar el análisis de la relación que existe entre la Evapotranspiración compuesta (ET) y el Índice de Área Foliar (LAI) durante un periodo de 5 años (2018-2022), se modela esta relación con una función lineal ($y = y_0 + a * x$), este modelo se escogió en función del rendimiento estadístico, seleccionando el modelo con mejor coeficiente de r^2 , además, la función cumple con la prueba de la línea horizontal, es decir, es una función inyectiva, donde para cada valor de x existe un valor de y . Se puede observar en la Figura 2 que la vasta mayoría de los datos están dentro del intervalo de predicción del modelo, lo que indica con

un 95% de confianza que las observaciones futuras estarán dentro de este rango, esta banda considera la variabilidad aleatoria como la variabilidad inherente al modelo.

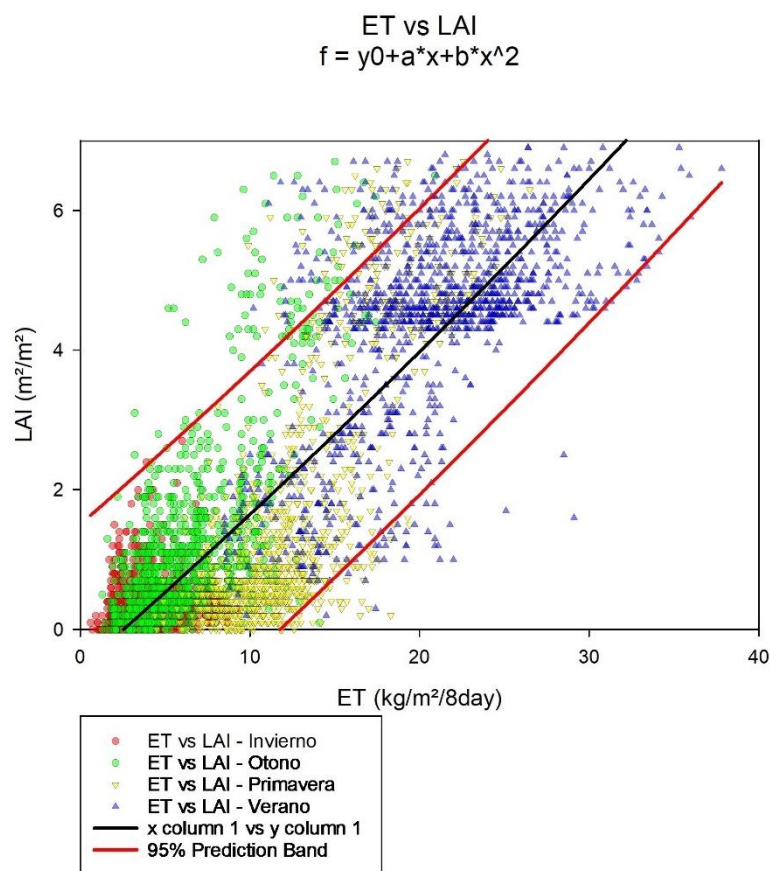


Figura 2. Grafico correspondiente a Evapotranspiración compuesta (ET) (kg/m²/8días) y el Índice de Área Foliar (LAI) de todos los sitios de estudio durante el periodo de 5 años (2018 a 2022)

Este modelo sugiere que hay una relación positiva entre el (LAI) y la (ET). Inicialmente, el LAI es bajo cuando la ET es baja y a medida que aumenta la ET, el LAI tiende a aumentar, aunque con una tasa de cambio que puede desacelerarse a mayores niveles de ET y concentrarse entre los valores 4 y 5 de LAI (m^2/m^2). Esto se puede entender debido a que a mayor LAI implica mayor superficie foliar disponible para la pérdida de agua o transpiración, por lo tanto, un aumento de la ET, como se puede observar en las gráficas generadas (figura 2)

La variación estacional en el LAI y la ET está estrechamente vinculada al ciclo de vida de la lenga, una especie caducifolia que durante las estaciones más frías, la pérdida de hojas conduce a una disminución del LAI, mientras que el rebrote durante la primavera y el verano coincide con un aumento significativo en ambas variables. Este patrón estacional refleja la influencia directa del LAI en la transpiración de la lenga y destaca su adaptación al entorno. La rápida respuesta del LAI al cambio estacional proporciona una comprensión valiosa de cómo esta especie responde dinámicamente a las condiciones ambientales, particularmente en términos de pérdida y regeneración foliar, aunque esta no es la única variable que influye en la ET y existe más variables ambientales que afectan a la ET como la temperatura, humedad del suelo, entre otros.

Estos resultados son de esperar si consideramos los resultados de estudios previos, donde para medir la ET uno de los factores que se toman en consideración es el LAI, como se menciona en estudio realizado por Yan, H., et

al (2012) El Índice de Área Foliar (LAI) se utiliza como una de las variables de entrada para estimar la evapotranspiración (ET) a través del modelo. La conductancia del dosel (G_c) se define como el producto del máximo coeficiente de conductancia estomática (g_{smax}), la humedad relativa del aire (R_h) y el LAI ($G_c = g_{smax} \times R_h \times LAI$), por lo cual es de esperar que tengan una relación positiva ambas

En resumen, LAI si es una variable que afecta directamente al aumento de la ET, los resultados revelan una relación lineal entre la evapotranspiración (ET) y el Índice de Área Foliar (LAI) en el ecosistema de lenga durante el período de estudio de cinco años (2018-2022). El modelo de componente lineal ($f = y_0 + ax$) demostró ser el más adecuado, exhibiendo un ajuste estadístico sólido con un alto coeficiente de determinación (R^2) de 0,739. La banda de predicción del 95% confirma la robustez del modelo, proporcionando una base confiable para las proyecciones futuras.

3.2. Evapotranspiración compuesta (ET) ($kg/m^2/8días$) versus Fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) (%)

Al analizar la relación entre la Evapotranspiración compuesta (ET) y la Fracción de Absorción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) durante un período de 5 años (2018-2022), esta relación se puede explicar mediante una función

lineal ($y = y_0 + a * x$), este modelo se escogió en función del rendimiento estadístico, seleccionando el modelo que mejor coeficiente de r^2 presentó, además de cumplir con la prueba de la línea horizontal. Como se observa en la Figura 3 este modelo sugiere que hay una relación lineal entre FPAR y ET, indicando que la variación en FPAR sigue una tasa de cambio constante en respuesta a la ET

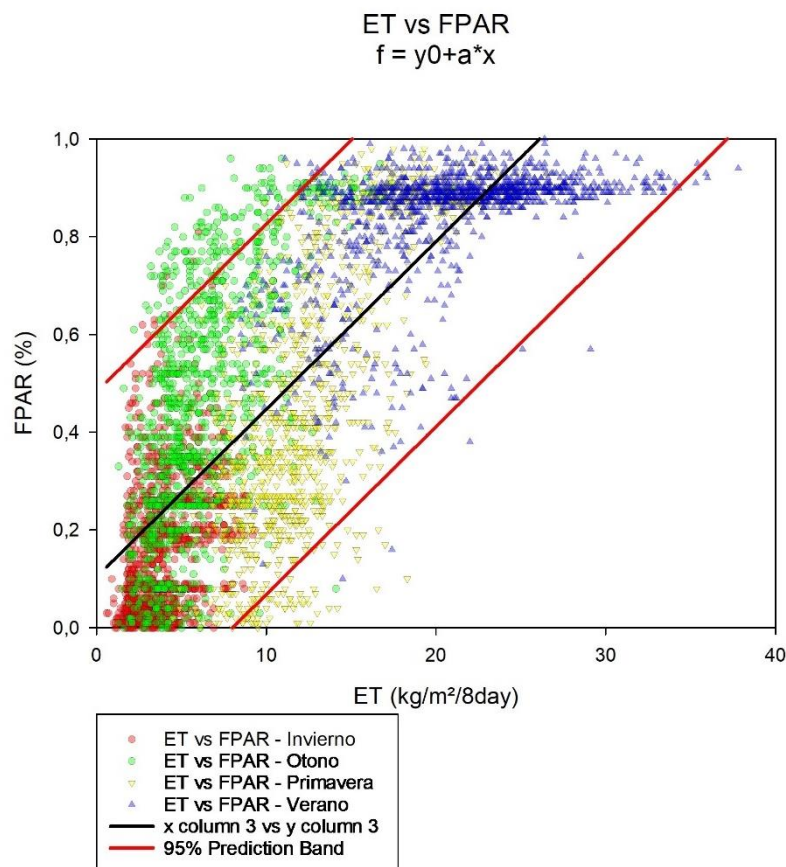


Figura 3. Gráfico correspondiente a la Evapotranspiración compuesta (ET) (kg/m²/8días) y la Fracción de Absorción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) de todos los sitios de estudio durante el periodo de 5 años (2018 a 2022)

Similar a la relación ET vs LAI, inicialmente el FPAR es bajo cuando la ET es baja, pero a medida que aumenta la ET, el FPAR tiende a aumentar, hasta un cierto punto de saturación entre los valores 0.8 a 1 (%), que es el máximo valor que puede obtener dado a los límites de absorción de radiación solar por parte de las plantas, que nos indica que aunque el ET sigue en aumento, el FPAR no seguirá aumentando, esto debido a que existen otras variables como la temperatura, humedad y otros factores ambientales que afectan al aumento del ET y no sólo el FPAR.

La basta mayoría de los datos se encuentra dentro del intervalo de predicción del modelo, con un 95% de confianza de que las observaciones futuras estarán dentro de este rango, el modelo cuenta con un r^2 de 0,645.

Un FPAR más alto indica que la planta está utilizando más radiación solar para la fotosíntesis, lo que puede llevar a un mayor crecimiento de la lenga y, por lo tanto, a una mayor transpiración. Las variaciones estacionales en FPAR y ET están estrechamente vinculadas a las condiciones específicas de cada estación. Durante las estaciones más frías, los valores de FPAR se concentran en el rango de 0 a 0.6 (%), mientras que la ET varía entre 2 y 12 ($\text{kg}/\text{m}^2/8\text{días}$), indicando menor actividad fotosintética y menor pérdida de agua. En primavera, se observa un aumento significativo en ambas variables, destacando la rápida respuesta de la vegetación a condiciones más favorables. En verano, la mayoría de los datos

se concentran en valores altos de FPAR (0.8 a 1 (%)) y ET (12 a 35 (kg/m²/8días)), indicando una estación de alta actividad fotosintética y transpiración.

Los resultados nos indican que el FPAR es un indicador influyente en la ET, ya que una mayor actividad fotosintética conlleva a un aumento en el crecimiento de las plantas y, por consiguiente, a una mayor transpiración. La ET también depende de otros factores como el tipo de vegetación, las condiciones climáticas y la disponibilidad de agua desempeñan un papel crucial en la regulación de la transpiración. Esto está estrechamente relacionado con la estimación de la ET dentro del algoritmo, como menciona Running, S., et al (2019) “El algoritmo de composición MOD15 utiliza una regla de selección simple en la que se elige el FPAR máximo (a lo largo de los ocho días) para su inclusión como píxel de salida. El mismo día elegido para representar la medida de FPAR también contribuye al valor de LAI del píxel actual. Esto significa que, aunque la ET se calcula diariamente, el algoritmo MOD16 asume necesariamente que el área foliar y el FPAR no varían durante un período de 8 días determinado”. Por lo tanto, ambas variables están estrechamente vinculadas, como queda en evidencia en los resultados obtenidos donde existe una relación positiva entre ambas variables. En resumen, estos resultados proporcionan una comprensión de la relación positiva entre ET y FPAR en el ecosistema estudiado, donde a medida que existe una mayor actividad fotosintética de la planta, también existe una mayor

transpiración de esta, esto queda respaldado por un modelo robusto que relaciona a ambas variables y que representa la variabilidad estacional característica de la lenga.

3.3. Evapotranspiración compuesta (ET) (kg/m²/8días) versus Temperatura de la Superficie Terrestre Día (LST Día) (°C)

Al examinar la relación entre la Evapotranspiración compuesta (ET) y la Temperatura de Superficie Terrestre durante el día (LST Día) a lo largo de un periodo de estudio, se utilizó una función cubica ($y = y_0 + ax + bx^2 + cx^3$) para modelar la relación entre ambas variables. La elección de este modelo se basó en su rendimiento estadístico, definido por el coeficiente de determinación (R^2), además, la función cumple con la prueba de la línea horizontal.

El modelo cúbico indica una relación no lineal entre la ET y la LST día. Aunque la contribución principal es lineal (coeficiente a), los términos cuadráticos y cúbicos permiten capturar efectos no lineales y una desaceleración o aceleración adicional en la relación a medida que cambian los niveles de evapotranspiración compuesta. Como se observa en la Figura 4 la mayoría de los datos se encuentran dentro del intervalo de predicción del modelo, indicando con un 95% de confianza que observaciones futuras estarán dentro de este rango. Esta

banda de predicción tiene en cuenta tanto la variabilidad aleatoria como la inherente al modelo.

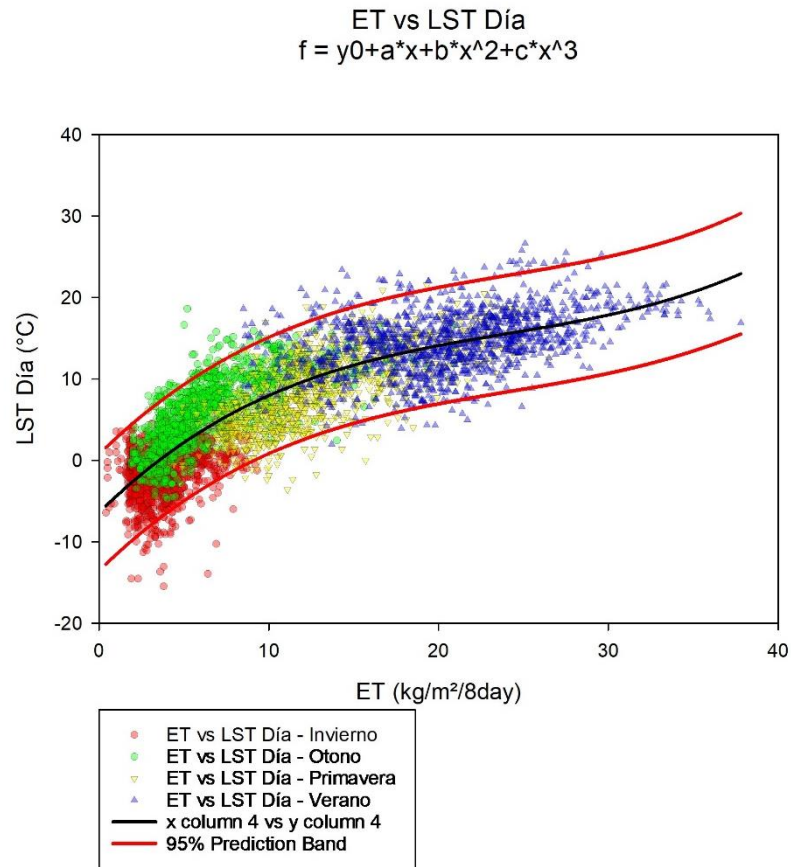


Figura 4. Gráfico correspondiente a la relación entre la Evapotranspiración compuesta (ET) (kg/m²/8días) y la Temperatura de Superficie Terrestre durante el día (LST Día) (°C) de todos los sitios de estudio durante el periodo de 5 años (2018 a 2022).

Estos resultados sugieren que, a medida que la ET aumenta, la respuesta de la LST aumenta, pero de manera no lineal, a una tasa de cambio no constante. Un

incremento en la LST implica un aumento en la temperatura superficial, lo que está asociado con el cambio de estación y por lo consecuente con el ciclo de la lenga que vuelve a brotar sus hojas en las temporadas más cálidas, un aumento de la temperatura y una mayor superficie foliar hacen que exista un aumento en evapotranspiración. Además del efecto propio de la estación del año y el proceso de rebrote de hojas de la lenga, está el efecto que tiene la temperatura sobre los estomas de la hojas de la lenga que permiten o limitan la transpiración de esta, que según la teoría de la optimización los estomas estarán abiertos solamente durante el día y considerando que para la obtención de la ET se utiliza un promedio de la temperatura diurna y nocturna (Running, S., et al (2019)), nos indica que esta relación está modelada por ambas variables (LST diurna y nocturna), lo que le da mayor complejidad a la interacción de ambas. Es importante señalar que la evapotranspiración actúa como un efecto buffer sobre la temperatura de superficie, regulando esta última y mostrando una conexión más compleja entre ambas.

Durante las estaciones más frías, la menor temperatura superficial coincide con valores más bajos de ET que es cuando la lenga queda sin hojas, mientras que el aumento de la LST durante la primavera y el verano coincide también con el aumento de la masa foliar.

Es importante destacar que, a pesar de la relación no lineal observada, la Temperatura Superficial Terrestre (LST) sigue siendo un factor clave que influye de manera positiva en la evapotranspiración compuesta (ET). Otros factores ambientales como la humedad del suelo y otras variables climáticas pueden modular esta relación.

En resumen, estos resultados revelan una conexión compleja y no lineal entre la ET y la LST de día en el ecosistema de lenga durante el periodo de estudio de cinco años (2018-2022). La robustez del modelo cúbico que presenta un R^2 de 0,736, destaca la necesidad de considerar la variabilidad estacional, así como también considerar el papel de la evapotranspiración como un efecto buffer que regula la temperatura superficial. La banda de predicción del 95% proporciona una medida de confianza para proyecciones futuras, resaltando la utilidad del modelo en la comprensión de la relación dinámica entre ET y LST diurna.

3.4. Evapotranspiración compuesta (ET) ($\text{kg/m}^2/8\text{días}$) versus Temperatura de la Superficie Terrestre Noche (LST Noche) ($^{\circ}\text{C}$)

La relación entre ET y la LST durante la noche está modelada por una función cúbica, esta se seleccionó en función de su rendimiento estadístico, con un R^2 de 0,544, además se consideró que cumpliera con la prueba de la línea horizontal. Esta función revela una relación no lineal entre la Evapotranspiración

(ET) y la Temperatura de Superficie Terrestre (LST) durante la noche. Aunque la contribución principal es lineal (coeficiente a), los términos cuadráticos y cúbicos permiten capturar efectos no lineales y la desaceleración o aceleración en la relación a medida que cambian los niveles de evapotranspiración compuesta como se observa la en la Figura 5 la mayoría de los datos se encuentran dentro del intervalo de predicción del modelo, indicando con un 95% de confianza que observaciones futuras estarán dentro de este rango. Esta banda de predicción tiene en cuenta tanto la variabilidad aleatoria como la inherente al modelo.

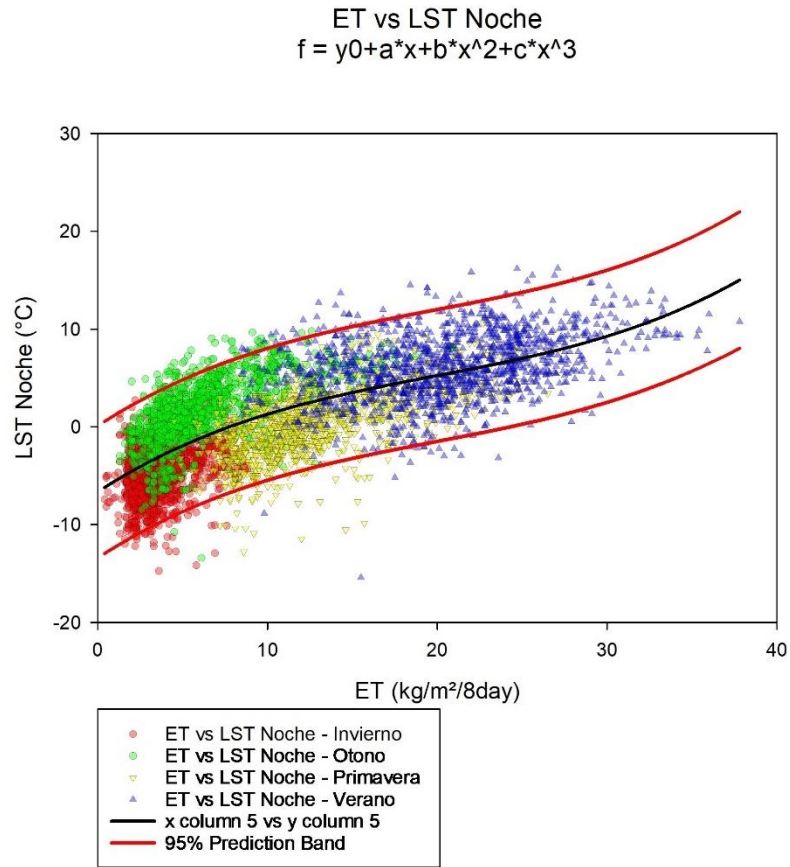


Figura 5. Gráfico correspondiente a la Evapotranspiración compuesta (ET) (kg/m²/8días) y la Temperatura de la Superficie Terrestre durante la Noche (LST Noche) (°C) de todos los sitios de estudio durante el periodo de 5 años (2018 a 2022)

Estos resultados sugieren que, a medida que la ET aumenta, la respuesta de la LST durante la noche no es lineal, con una tasa de cambio que no constante, pero si positiva. Se observa que un incremento en la LST nocturna está asociado con el cambio de estación y con el ciclo de la lenga que, al ser una especie caducifolia, en las temporadas con condiciones más favorables climáticamente

vuelven a brotar sus hojas. Ambas variables, el aumento de la temperatura y una mayor superficie foliar, contribuyen al incremento de la evapotranspiración. En cambio, durante las estaciones más frías, la menor LST nocturna coincide con valores más bajos de ET, cuando la lenga queda sin hojas. Esta relación puede ser una de las más complejas para analizar debido a que si consideramos la teoría de la optimización, el estoma se cerrara durante la noche para prevenir la pérdida de agua cuando no hay oportunidad de ganancia de carbón (Dawson et al. 2007), considerando esto los datos de ET durante la noche deberían ser mínimos ya que solo tendría la transpiración a través de cutícula y por el borde de la hoja (Running, S., et al (2019)), pero los datos de ET proporcionados por MODIS son un promedio de la ET diurna y nocturna, por lo que se puede asumir que la mayor influencia de ET es durante el día. Además, se debe considerar que la transpiración por parte del dosel no es el único factor que influye en el calculo de la ET, como menciona (Running, S., et al (2019)) “La evaporación de la superficie del dosel húmedo, la transpiración de la superficie del dosel seco y la evaporación de la superficie del suelo son sumadas para obtener la evapotranspiración total diaria.” Lo que nos da entender lo complejo de esta interacción.

En resumen, estos resultados revelan una conexión compleja y no lineal entre la Evapotranspiración (ET) y la Temperatura de Superficie Terrestre (LST) durante la noche en el ecosistema de lenga durante el periodo de tiempo de estudio. La

robustez del modelo cúbico destaca la necesidad de considerar la variabilidad estacional, así como también el papel crucial de la evapotranspiración como un efecto buffer que regula la temperatura superficial nocturna. La banda de predicción del 95% proporciona una medida de confianza para proyecciones futuras, resaltando la utilidad del modelo en la comprensión de la relación dinámica entre ET y LST nocturna.

3.5. Índice de Área Foliar (LAI) versus Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR)

Al analizar la relación existente entre el Índice de Área Foliar (LAI) y la Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) durante un periodo de 5 años (2018-2022), se empleó una función de componente cúbica ($y = y_0 + ax + bx^2 + cx^3$) para modelar la relación entre estas dos variables. Este modelo fue seleccionado en base a su rendimiento estadístico, siendo elegido por presentar el coeficiente de determinación (R^2) más alto, además, la función cumple con la prueba de la línea horizontal. El modelo cúbico, que se observa en la Figura 6 sugiere una relación positiva no lineal entre el LAI y la FPAR a lo largo del tiempo. La mayoría de los datos se sitúan dentro del intervalo de predicción del modelo, indicando con un 95% de confianza que las observaciones futuras estarán dentro de este rango. Esta banda considera tanto la variabilidad aleatoria como la inherente al modelo. Estos resultados demuestran que el impacto del LAI en la

FPAR no sigue una relación lineal, mostrando una tasa de cambio no constante a medida que la FPAR aumenta.

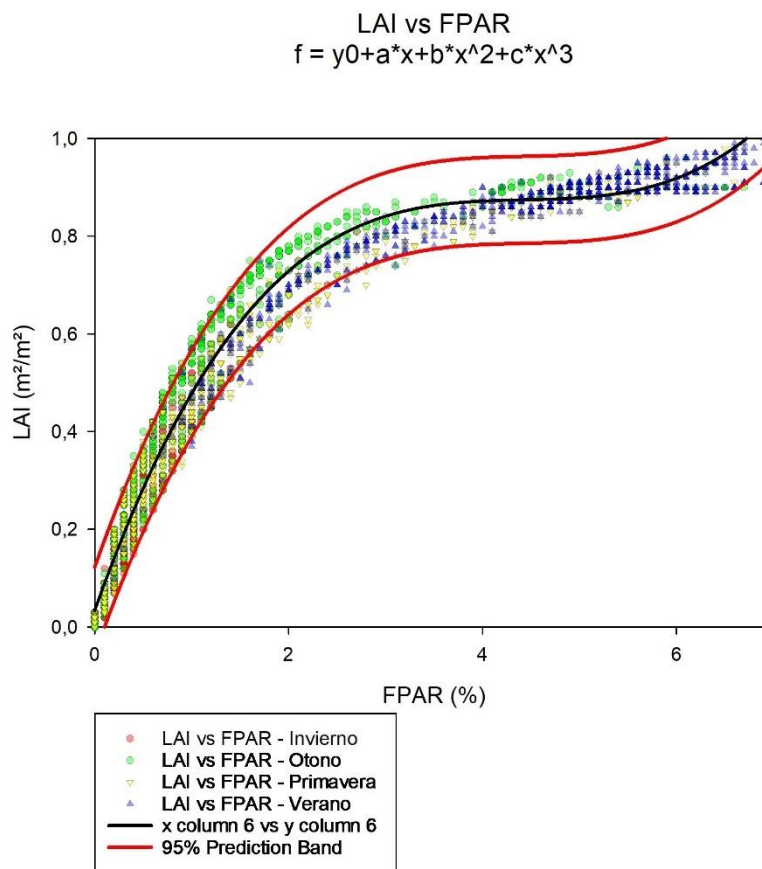


Figura 6. Gráfico correspondiente a el Índice de Área Foliar (LAI) y la Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) de todos los sitios de estudio durante el periodo de 5 años (2018 a 2022).

Al analizar la relación existente entre el Índice de Área Foliar (LAI) y la Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) durante un periodo de 5 años (2018-2022), se empleó una función de componente cúbica ($y = y_0 + ax + bx^2 + cx^3$) para modelar la relación entre estas dos variables. Este modelo fue seleccionado en base a su rendimiento estadístico, siendo elegido por presentar el coeficiente de determinación r^2 más alto con un valor de 0,98, además, la función cumple con la prueba de la línea horizontal. El modelo cúbico sugiere una relación positiva no lineal entre el LAI y la FPAR a lo largo del tiempo. La mayoría de los datos se sitúan dentro del intervalo de predicción del modelo, indicando con un 95% de confianza que las observaciones futuras estarán dentro de este rango. Esta banda considera tanto la variabilidad aleatoria como la inherente al modelo. Estos resultados demuestran que el impacto del LAI en la FPAR no sigue una relación lineal, mostrando una tasa de cambio no constante a medida que la FPAR aumenta.

Inicialmente, se observa que el FPAR es bajo al igual que el LAI, pero a medida que aumenta el LAI, el FPAR tiende a incrementarse, esta relación se debe a que al existir mayor área foliar, hay más hojas disponibles para absorber la radiación fotosintéticamente activa, por lo tanto, a medida que aumente el LAI irá aumentando el FPAR, pero como se puede observar en las gráficas presentadas (Figura 6), la curva se estabiliza entre los valores de LAI de 3 a 6, manteniendo un FPAR estable con valores entre 0.7 a 0.9, esto puede indicar que aunque haya

un aumento en la superficie foliar, la fracción de radiación fotosintéticamente activa no podrá seguir aumentando al mismo ritmo que el LAI, esto sugiere aspectos importantes sobre la capacidad de la lenga para absorber y utilizar la radiación fotosintéticamente activa, estos datos también se asocian a la época de verano.

La variación estacional en el LAI y la FPAR está estrechamente vinculada al ciclo de vida de la lenga, una especie caducifolia. La pérdida de hojas durante las estaciones más frías conduce a una disminución del LAI y, por ende, del FPAR, mientras que el rebrote durante la primavera y el verano coincide con un aumento significativo en ambas variables. Esta sincronización resalta la influencia directa del LAI en la absorción de radiación fotosintéticamente activa y subraya la capacidad dinámica de la lenga para adaptarse a su entorno. Esto se puede contrastar con otros estudios, como el que describe Serbin, S. et al. (2013) donde sus hallazgos destacan una clara relación estacional de FPAR y LAI, coherente con un aumento durante la primavera y el verano, seguido de una disminución al final de la temporada, reflejado de manera consistente por los productos MODIS y las mediciones in situ.

En resumen, los resultados indican una relación no lineal entre el Índice de Área Foliar (LAI) y la Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) en el ecosistema de lenga durante el periodo de estudio de cinco años (2018-2022). El

modelo cúbico demostró ser el más adecuado, exhibiendo un sólido ajuste estadístico con un elevado coeficiente de determinación (R^2). La banda de predicción del 95% respalda la robustez del modelo, proporcionando una base fiable para proyecciones futuras y una comprensión más profunda de la dinámica ecológica de la lenga en respuesta a cambios ambientales.

3.6. Índice de Área Foliar (LAI) versus Temperatura de la Superficie Terrestre Día (LST Día) ($^{\circ}\text{C}$)

En el análisis realizado a la relación entre los índices de área foliar (LAI) (m^2/m^2) y la Temperatura de Superficie Terrestre durante el día (LST Día) ($^{\circ}\text{C}$) durante el periodo de estudio, se empleó la función cubica ($y = y_0 + ax$) esta función se escogió en función de su rendimiento estadístico, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,561, además, la función cumple con la prueba de la línea horizontal. Este modelo que se observa en la Figura 7 indica la relación lineal positiva entre ambas variables. La mayoría de los datos se sitúan dentro del intervalo de la banda predicción, con un 95% de confianza que observaciones futuras estarán dentro de este rango de dispersión.

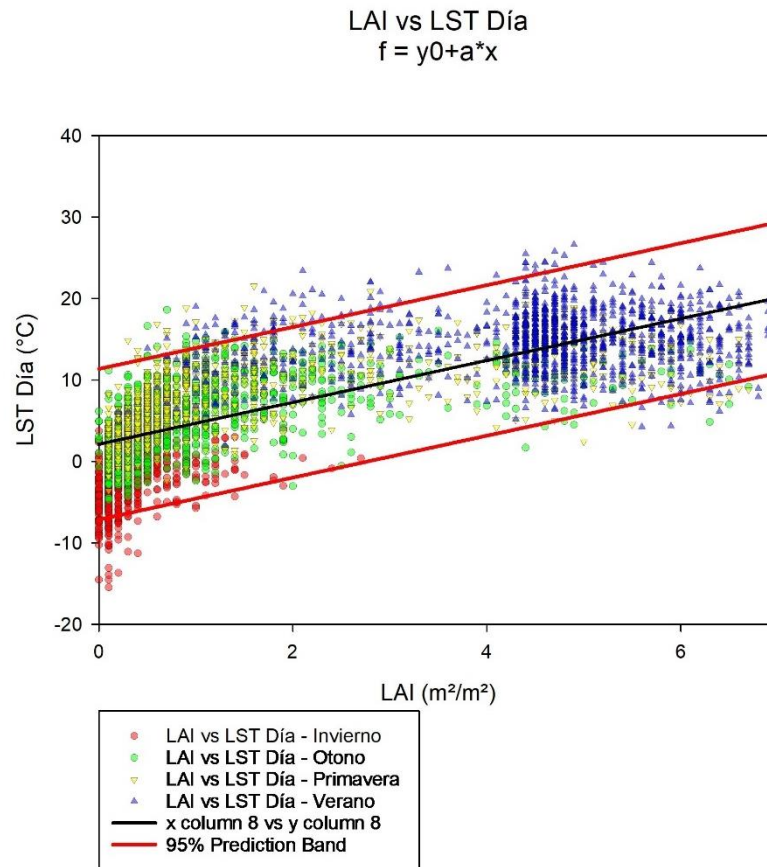


Figura 7. Gráfico correspondiente al Índice de Área Foliar (LAI) (m²/m²) y la Temperatura de Superficie Terrestre durante el día (LST Día) (°C) de todos los sitios de estudio durante el periodo de 5 años (2018 a 2022).

La relación positiva entre el LAI y la LST durante el Día sugiere que, a medida que la temperatura aumenta, el LAI experimenta un crecimiento. Esta tendencia está fuertemente vinculada a las estaciones, siendo los valores de LAI más altos (entre 4 y 6) predominantes durante el verano, coincidiendo con las temperaturas más elevadas. Este comportamiento se explica por el ciclo de vida de la lenga, una especie caducifolia, que en las estaciones frías pierde sus hojas y

experimenta un rápido rebrote durante la primavera y el verano. Esta respuesta dinámica del LAI a condiciones climáticas más favorables destaca la conexión directa entre la estacionalidad y las mediciones de LAI. Pero esta relación es más compleja debido a que mayor superficie de área foliar hay un efecto de regulación de la temperatura, como indica el estudio realizado por Zolles, A., et al. (2021) que demostró que bajo un bosque bajo su fase máxima de dosel (mayor LAI) tiene una regulación de la temperatura máximas en -3.86°C y sin follaje de -1.92°C , esto comparado con las máximas temperaturas una superficie de tierra sin cobertura vegetal cercana, por un periodo de 8 años. Lo que demuestra la complejidad de esta relación, dado que a mayores temperaturas existe una mayor LAI ya que coincide con la estación primavera-verano y a su vez una regulación de las temperaturas altas producto de un mayor LAI.

En síntesis, el análisis de la relación entre el Índice de Área Foliar (LAI) y la Temperatura de Superficie Terrestre durante el día (LST Día) a lo largo de un periodo de 5 años revela una relación positiva y dinámica en el ecosistema de lenga, la relación puede ser compleja y depender de más factores, como en este caso, la estacionalidad que determina fuertemente el LAI, y la ET que, al haber mayor superficie foliar, existe mayor transpiración y por lo tanto una regulación de la temperatura, variables climáticas como la precipitación también pueden afectar estas variables. El modelo lineal propuesto captura la complejidad de esta relación y la banda de predicción del 95% respaldan la confiabilidad de estos

resultados y ofrecen una perspectiva para futuros estudios e investigaciones en ecosistemas similares, según el estudio de Xing et al. (2021), el método de regresión lineal múltiple con observaciones diurnas y nocturnas de MODIS demuestra una alta precisión en la estimación de la temperatura superficial media diaria, con R^2 superior a 0.99 y RMSE inferior a 1.60 K. La combinación de cuatro observaciones diarias resulta en la mayor precisión, con un RMSE de 0.80 K. Estos resultados respaldan la aplicabilidad y confiabilidad de los datos MODIS para la estimación precisa de temperaturas superficiales diarias.

3.7. Índice de Área Foliar (LAI) versus Temperatura de la Superficie Terrestre Noche (LST Noche)

En este análisis, se exploró la relación entre los índices de área foliar (LAI) (m^2/m^2) y la temperatura de superficie terrestre durante la noche (LST Noche) ($^{\circ}C$) a lo largo del periodo de 5 años (2018 al 2023). Se utilizó una función lineal ($f = y_0 + ax$) para modelar la relación, seleccionando este modelo debido a su adecuado rendimiento y simplicidad. La elección se basó en el coeficiente de determinación (R^2) de 0,47, optando por aquel que demostró un mejor ajuste, además, la función cumple con la prueba de la línea horizontal. Como se puede observar en la Figura 8 la mayoría de los datos se encuentra dentro del intervalo de la banda de predicción, con un 95% de confianza en que las observaciones futuras estarán dentro de este rango de dispersión.

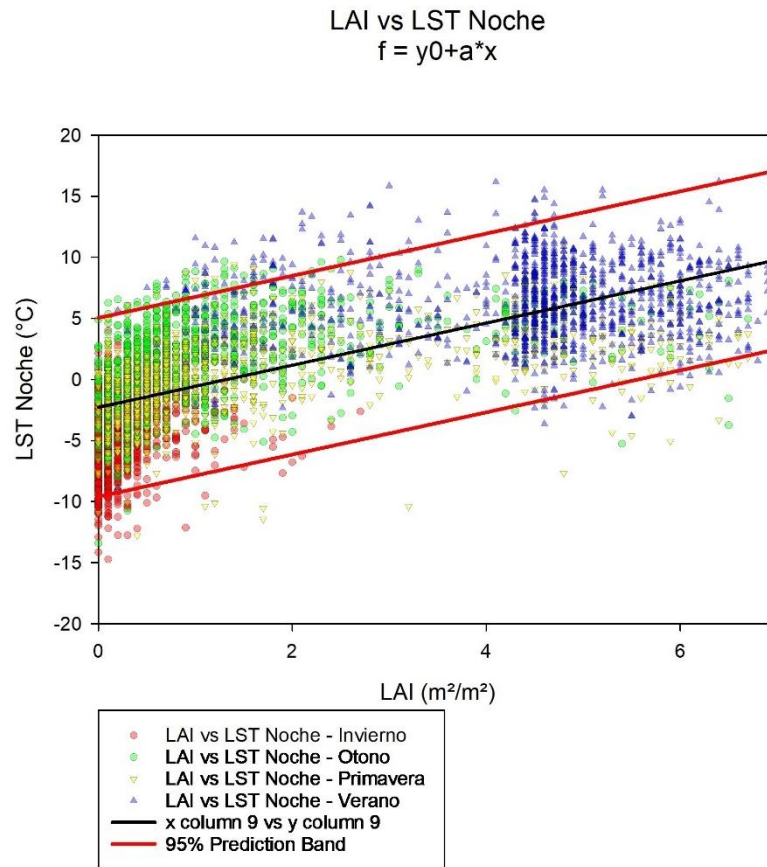


Figura 8. Gráfico correspondiente a índice de área foliar (LAI) (m²/m²) y la temperatura de superficie terrestre durante la noche (LST Noche) (°C) de todos los sitios de estudio durante el periodo de 5 años (2018 a 2022).

La relación lineal entre el LAI y la LST durante la noche sugiere un comportamiento más constante a lo largo de la noche, aunque sigue fuertemente influenciado por la estacionalidad. Al igual que en el análisis diurno, se observa una respuesta significativa del LAI a las condiciones climáticas.

A diferencia de la temperatura durante el día el dosel durante la noche no actúa absorbiendo la radiación solar, durante la noche, el bosque se enfría mediante la

emisión de radiación de onda larga y el movimiento del aire está dominado por fuerzas de flotabilidad (Mahrt et al., 2001, Goulden et al., 2006). Los flujos de drenaje que se producen a lo largo de la topografía inclinada hacen que la elevación se vuelva el factor clave en la determinación de la temperatura del aire. Por consiguiente, a lo largo del gradiente de índice de área foliar, las temperaturas nocturnas tienden a ser similares, y no se observa una tendencia significativa en la temperatura mínima (Hardwick, S., et al 2015).

En síntesis, este análisis de la relación entre el Índice de Área Foliar (LAI) y la Temperatura de Superficie Terrestre durante la Noche (LST Noche) a lo largo de 5 años revela una conexión que puede ser explicada de manera más simple mediante una relación lineal. La estacionalidad sigue siendo un factor clave en la variabilidad de esta relación, lo que resalta la necesidad de considerar la influencia de los ciclos estacionales en futuras investigaciones. El modelo lineal propuesto proporciona una representación adecuada de esta dinámica, respaldado por la banda de predicción del 95%, ofreciendo un punto de partida valioso para análisis más detallados en ecosistemas similares.

3.8. Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) versus Temperatura de la Superficie Terrestre Día (LST Día) (°C)

En el análisis realizado a la relación entre la Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) y la Temperatura de Superficie Terrestre durante el día (LST Día) (°C) a lo largo del periodo de 5 años (2018 al 2023), se realizó modelando la relación con una función cúbica ($y = y_0 + ax + bx^2 + cx^3$), esta función se escogió según su rendimiento estadístico, evaluado mediante el coeficiente de determinación (R^2) de 0,693, y que la función cumpliera la prueba de la línea horizontal. Este modelo que se puede ver en la Figura 9 indica la relación no lineal entre ambas variables, donde la variable lineal 'a', destaca por su mayor valor e influencia en la curva, mientras que las variables 'b' y 'c' describen la no linealidad del modelo, explicando la aceleración o desaceleración correspondiente. La mayoría de los datos se sitúan dentro del intervalo de la banda de predicción, con un 95% de confianza que observaciones futuras estarán dentro de este rango de dispersión.

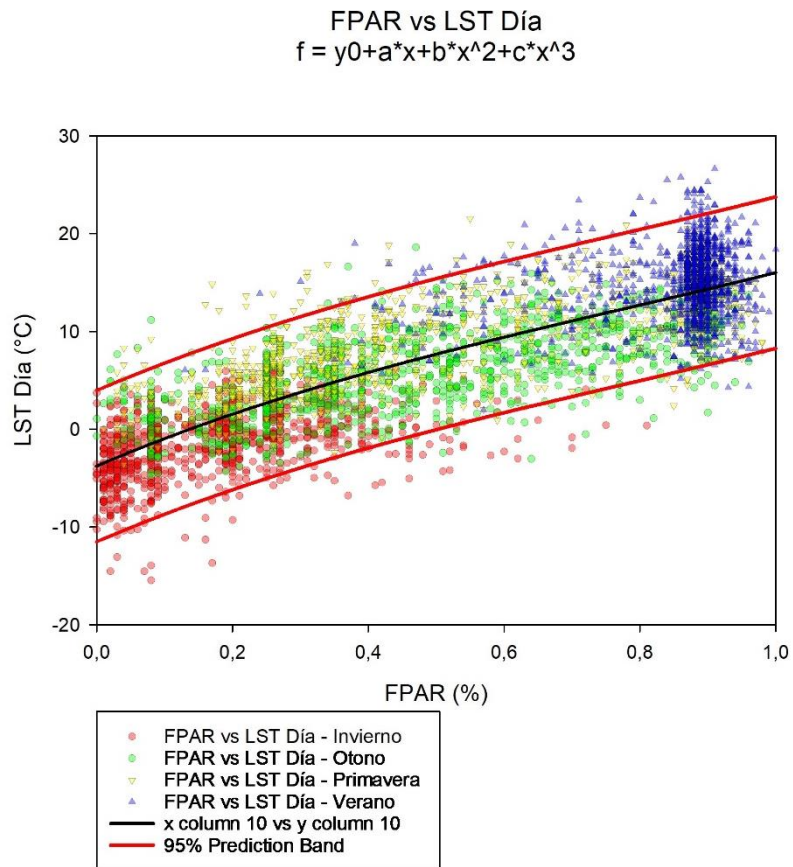


Figura 9. Gráfico correspondiente a Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) y la Temperatura de Superficie Terrestre durante el día (LST Día) (°C) de todos los sitios de estudio durante el periodo de 5 años (2018 a 2022).

La relación no lineal entre el FPAR y la LST durante el día sugiere que, a medida que la temperatura aumenta, el FPAR experimenta un crecimiento no constante. Esta tendencia está fuertemente vinculada a las estaciones, siendo los valores de FPAR más altos predominantes durante el verano (valores entre 0.7 y 1.0), coincidiendo con las temperaturas más elevadas. Este comportamiento se explica por el ciclo de vida de la lenga, una especie caducifolia, que en las

estaciones frías pierde sus hojas y experimenta un rápido rebrote durante la primavera y el verano y dado que las hojas son las responsables de la absorción de la fracción de radiación fotosintéticamente activa, depende en gran medida de los niveles de LAI. Esta respuesta dinámica del FPAR a condiciones climáticas más favorables indican que en la temporada de primavera verano, existe una alta actividad fotosintética, lo cual está relacionado con el rebrote de las hojas, y esto también está relacionado con una mayor transpiración, lo que genera un enfriamiento en la zona, actuando como un buffer para los cambios de temperatura, este comportamiento está influenciado además por otros factores como las condiciones climáticas, la precipitación, la humedad entre otros.

Como menciona Hardwick, S., et al (2015) durante las horas diurnas, la radiación solar penetra a través de la cobertura vegetal y es captada por las hojas, lo que genera un calentamiento del aire dentro del área cubierta por la vegetación. La luz que no es absorbida por esta capa vegetal llega al suelo, donde es mayormente absorbida, resultando en el calentamiento de la superficie terrestre. Conforme el suelo se calienta, el calor se transfiere hacia abajo en las capas más profundas del suelo y se trasmite al aire inmediatamente. Por lo cual la FPAR, junto con el LAI tiene un papel importante en la regulación de temperatura.

En conclusión, el análisis de la relación entre la Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) y la Temperatura de Superficie Terrestre durante el día (LST Día) a lo largo de un periodo de 5 años revela una conexión

no lineal y dinámica en el ecosistema de lenga. La relación puede ser compleja y depender de más factores, como en este caso, marcado por la estacionalidad que determina fuertemente el FPAR, dado el ciclo de vida de la lenga y que a medida que las condiciones climáticas son más favorables, existe mayor superficie foliar para realizar fotosíntesis, y por lo tanto mayor absorción de radiación solar, también existe mayor transpiración y por lo tanto una regulación de las temperaturas. El modelo cúbico propuesto captura la complejidad de esta relación y la banda de predicción del 95% respaldan la confiabilidad de estos resultados y ofrecen una perspectiva para futuros estudios e investigaciones en ecosistemas similares.

3.9. Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) versus Temperatura de la Superficie Terrestre Noche (LST Noche)

Se analizó la relación entre Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) versus Temperatura de la Superficie Terrestre Noche (LST Noche) utilizando una función cuadrática $f = y_0 + a * x + bx^2$. Este modelo fue seleccionado por su rendimiento estadístico, evaluado mediante el coeficiente de determinación (R^2), con un valor de 0,593 y su cumplimiento con la prueba de la línea horizontal. El modelo indica una relación no lineal entre FPAR y LST Noche, se observó, que similar a la LST Día, a medida que la temperatura aumenta, el FPAR experimenta un crecimiento, esto fuertemente vinculado a las estaciones,

como se puede apreciar en la Figura 10, con valores más altos durante el verano (valores entre 0.7 y 1.0 %), coincidiendo con las temperaturas más elevadas.

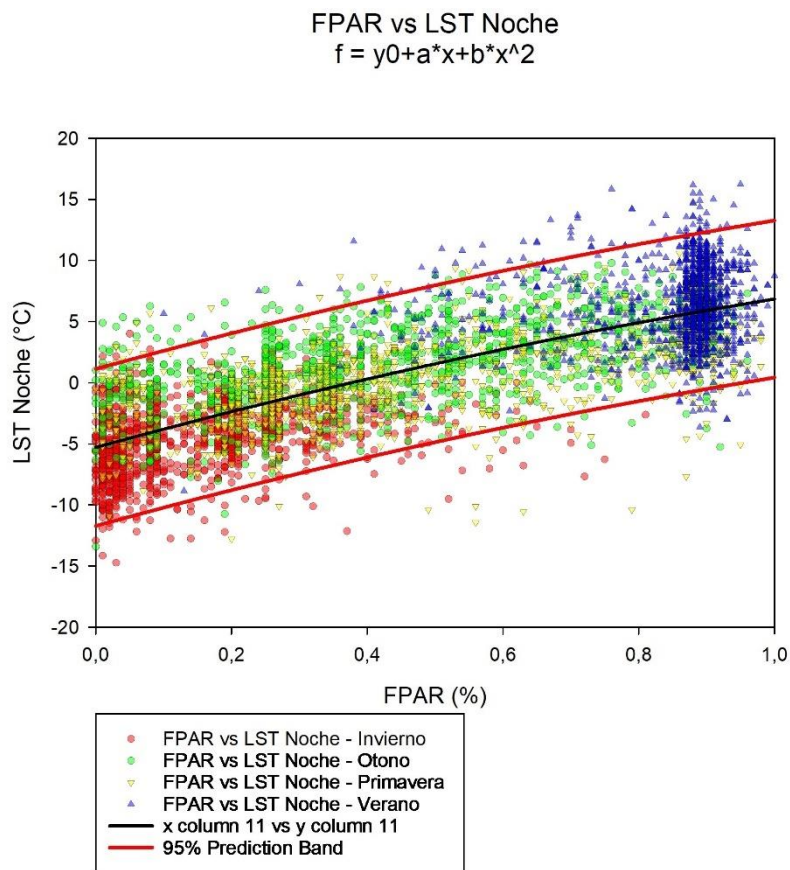


Figura 10. Gráfico correspondiente a la Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) (%) versus Temperatura de la Superficie Terrestre Noche (LST Noche) (°C) de todos los sitios de estudio durante el periodo de 5 años (2018 a 2022).

En síntesis, el análisis revela una conexión no lineal en el ecosistema de lenga entre FPAR y LST Noche, con una marcada concentración de datos en el verano dentro de los rangos de 0,8 y 0,9 de FPAR. Sin embargo, al igual que con LST Día, la relación puede ser compleja y depender de factores adicionales, como la estacionalidad y las condiciones climáticas. Hay que considerar que durante la noche se registra radiación, por lo cual cualquier influencia que tenga FPAR en la LST durante la noche se debe a lo ocurrido durante el día, considerar además que durante la noche el bosque se enfría por medio de la emisión de ondas largas de radiación y el movimiento del aire está dominado por fuerzas de flotabilidad (Mahrt et al., 2001, Goulden et al., 2006). El modelo lineal propuesto captura la dispersión de esta relación y ofrece una perspectiva para futuros estudios en ecosistemas similares. La banda de predicción del 95% respalda la confiabilidad de estos resultados.

IV. CONCLUSIONES

Este estudio ha proporcionado una comprensión detallada de la dinámica ecológica del ecosistema de lenga (*Nothofagus pumilio*) en la región de Aysén durante el periodo de cinco años (2018-2022) a través del análisis de productos MODIS. Se han explorado las relaciones entre variables de estudio y como varían según la estación del año, fuertemente marcada por la característica caducifolia de la lenga, destacando hallazgos significativos que contribuyen a la comprensión de este ecosistema. La Evapotranspiración Compuesta (ET) ha emergido como un componente particular que regula las Temperaturas de la Superficie Terrestre (LST), mostrando una relación compleja y no siempre lineal. El Índice de Área Foliar (LAI) ha revelado una conexión positiva no lineal marcada con la Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR), enfatizando la importancia de considerar la variabilidad estacional. La relación positiva entre el LAI y la LST durante el día subraya la influencia de las estaciones en el crecimiento foliar, así también la relación lineal entre el LAI y la LST durante la noche indica una respuesta más constante, aunque claramente influenciada por las estaciones. Además, la relación no lineal entre el FPAR y la LST durante el día destaca una alta actividad fotosintética en primavera-verano y como la absorción de la radiación por parte del dosel influye en la temperatura.

Estos resultados no solo han verificado nuestras hipótesis iniciales, sino que también proporcionan valiosas recomendaciones para futuras investigaciones y la gestión de recursos naturales asociados a la lenga en la región de Aysén. Se destaca la necesidad de considerar cuidadosamente la variabilidad estacional y la regulación térmica a través de la ET en futuros estudios ecológicos. Además, este estudio marca la importancia del uso de herramientas satelitales para el monitoreo y estudio de ecosistemas naturales, dado a su accesibilidad y capacidad de obtención de datos a escala global, de forma continua a lo largo del tiempo, lo que permite realizar un seguimiento a largo plazo de los cambios en el paisaje. En conjunto, este estudio contribuye al conocimiento de la dinámica ecológica de la lenga en ecosistemas similares y establece una sólida base para la toma de decisiones informada en la gestión territorial de la región de Aysén.

V. GLOSARIO

MODIS: Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada, del inglés moderate resolution imaging spectroradiometer sensor de la Nasa a bordo de los satélites Aqua y Terra que captura datos de diferentes franjas espectrales.

ET: La evapotranspiración (ET) es el proceso por el cual el agua se evapora desde la superficie del suelo, se transpira y se evapora a través de las plantas hacia la atmósfera; tienen una resolución de 500 metros, se capturan cada 8 días y los valores de píxel para la evapotranspiración compuesta son la suma de todos los días dentro del periodo compuesto, expresados en kilogramos por cada metro cuadrado compuesto en 8 días ($\text{kg}/\text{m}^2/8\text{días}$)

LAI: El área de hojas verdes de un solo lado por unidad de área terrestre en el dosel de hojas (m^2 de hojas/ m^2 de superficie) es una colección de datos compuestos de 8 días y presenta una resolución de píxel de 500 metros

FPAR: Es la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el dosel vegetal, que representa la porción de la radiación solar entrante a la superficie terrestre entre las longitudes de onda 400 y 700 nm utilizada para estimar la cantidad de radiación solar absorbida por el dosel vegetal

LST: La Temperatura de superficie terrestre, LST por sus siglas en inglés (Land Surface Temperature), es la medida de la temperatura en Kelvin de la superficie terrestre promedio por píxel para periodos de 8 días, con una resolución espacial de 1 kilómetro (km) observada desde el espacio

VI. BIBLIOGRAFÍA

Aguilar-Lomea, J., Espinoza-Villar, R., Espinoza, J., Rojas-Acuña, J., Willems, B. L., & Leyva-Molina, W. M. (2019). Elevation-dependent warming of land surface temperatures in the Andes assessed using MODIS LST time series (2000–2017). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 77, 119–128.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (s.f.). Relieve de la Región de Aysén. Recuperado de <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region11/relieve.htm>

Fang, H., Wei, S., Liang, S. (2012). Validation of MODIS and CYCLOPES LAI products using global field measurement data. *Remote Sensing of Environment*, 119, 43–54.

Goulden M.L., Miller S.D., da Rocha H.R. Nocturnal cold air drainage and pooling in a tropical forest. *J. Geophys. Res.* 2006;111:D8

Hardwick SR, Toumi R, Pfeifer M, Turner EC, Nilus R, Ewers RM. The relationship between leaf area index and microclimate in tropical forest and oil palm plantation: Forest disturbance drives changes in microclimate. *Agric For Meteorol.* 2015 Feb 15;201:187-195.

Hepp, C., Stolpe, N. B., & (2014). Caracterización y propiedades de los suelos de la Patagonia Occidental (Aysén). *INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS, Boletín INIA, N° 298.*

Hepp, C., Reyes, C., & Muñoz, R. (2018). Análisis de datos históricos de cinco estaciones meteorológicas de la región de Aysén (Patagonia). *INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS, Boletín INIA, N° 365.*

Li, H., Sun, D., Yu, Y., Wang, H., Liu, Y., Liu, Q., Du, Y., Wang, H., & Cao, B. (2014). Evaluation of the VIIRS and MODIS LST products in an arid area of Northwest China. *Remote Sensing of Environment*, 142, 111–121.

Mahrt L., Vickers D., Nakamura R., Soler M.R., Sun J., Burns S., Lenschow D.H. Shallow drainage flows. *Boundary Layer Meteorol.* 2001;101:243–260.

Mu, Q., Heinsch, F. A., Zhao, M., & Running, S. W. (2007). Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment*, 111(4), 519–536.

Morissette, J. T., Privette, J. L., & Justice, C. O. (2002). A framework for the validation of MODIS Land products. *Remote Sensing of Environment*, 83, 77–96.

Myneni, R., Knyazikhin, Y., Park, T. (2021). *MODIS/Terra+Aqua Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061* [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. Accessed 2023-12-17 from <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD15A2H.061>.

Premoli A. 2004. Variación en *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser (Lenga). In Donoso C, A Premoli, L Gallo, R Ipinza eds. Variación Intraespecífica en las especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina. Santiago, Chile. Editorial Universitaria. p. 145-166.

Serbin, S. P., Ahl, D. E., & Gower, S. T. (2013). Spatial and temporal validation of the MODIS LAI and FPAR products across a boreal forest wildfire chronosequence. *Remote Sensing of Environment*, 133(1), 71–84

Shabanov, N. V., Kotchenova, S., Huang, D., Yang, W., Tan, B., Knyazikhin, Y., et al. (2005). Analysis and optimization of the MODIS leaf area index algorithm retrievals over broadleaf forests. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43, 1855–1865.

Shestakova, T. A., Mackey, B., Hugh, S., Dean, J., Kukavskaya, E. A., Laflamme, J., Shvetsov, E. G., & Rogers, B. M. (2022). Mapping Forest Stability within Major Biomes Using Canopy Indices Derived from MODIS Time Series. *Remote Sensing*, 14(15), 3813. <https://doi.org/10.3390/rs14153813>

Qiao, L., Will, R., Wagner, K., Zhang, T., & Zou, C. (2022). Improvement of evapotranspiration estimates for grasslands in the southern Great Plains:

Comparing a biophysical model (SWAT) and remote sensing (MODIS). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 44, 101275.

Raj A., L.K. Sharma. 2022. Eco-biophysical indicators to ascertain the sustainability aspect of the world's primitive hills range using time-series MODIS data products. *Ecological Informatics* 69.

Running, S. W., Mu, Q., Zhao, M., & Moreno, A. (2021). *User's Guide: MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (MOD16A2/A3 and Year-end Gap-filled MOD16A2GF/A3GF)*. NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (For Collection 6.1).

Vancutsem, C., Ceccato, P., Dinku, T., & Connor, S. J. (2010). Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate air temperature in different ecosystems over Africa. *Remote Sensing of Environment*, 114, 449–465.

Wan, Z. (2008). New refinements and validation of the MODIS Land-Surface Temperature/Emissivity products. *Remote Sensing of Environment*, 112, 59–74.).

Wang, S., Pan, M., Mu, Q., Shi, X., Mao, J., Brümmer, C., Jassal, R. S., Krishnan, P., Li, J., & Black, T. A. (2015). Comparing Evapotranspiration from Eddy Covariance Measurements, Water Budgets, Remote Sensing, and Land Surface Models over Canada. *Journal of Hydrometeorology*, 16. DOI: 10.1175/JHM-D-14-0189.1

Wan, Z., Hook, S., Hulley, G. (2021). *MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1km SIN Grid V061* [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center.

Xing Z., Li, Z., Daun, S., Liu, X., Zheng, X., Leng, P., Gao, M., Zhang, X., Shang, G. (2021) Estimation of daily mean land surface temperature at global scale using pairs of daytime and nighttime MODIS instantaneous observations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 178, 51–67.

Yan, K., Park, T., Yan, G., Chen, C., Yang, B., Liu, Z., Nemani, R. R., Knyazikhin, Y., & Myneni, R. B. (2016). Evaluation of MODIS LAI/FPAR Product Collection 6.

Part 1: Consistency and Improvements. *Remote Sensing*, 8, 359.
<https://doi.org/10.3390/rs8050359>

Yan, H., Wang, S. Q., Billesbach, D., Oechel, W., Zhang, J. H., Meyers, T., Martin, T. A., Matamala, R., Baldocchi, D., Bohrer, G., Dragoni, D., & Scott, R. (2012). Global estimation of evapotranspiration using a leaf area index-based surface energy and water balance model. *Remote Sensing of Environment*, 124, 581–595.

Yang, W., Huang, D., Tan, B., Stroeve, J. C., Shabanov, N. V., Knyazikhin, Y., Nemani, R. R., & Myneni, R. B. (2006). Analysis of Leaf Area Index and Fraction of PAR Absorbed by Vegetation Products From the Terra MODIS Sensor: 2000–2005. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7), July 2006.