

Series:  
Comunicaciones Técnicas  
ISSN 1667-4014

**COMUNICACIÓN TÉCNICA N°141**  
**Área Recursos Naturales**  
**Pastizales Naturales**

**SIMPAT**  
**Sistema de Monitoreo de Pastizales y Alerta**  
**Temprana:**  
**Dinámica y Prospectiva de la productividad de**  
**la vegetación en la Cuenca Alta del Río Limay**

**Diciembre 2020**

*Easdale, M.; Bruzzone; O.*

*Umaña, F.; Marciani, S.N.*

**2020**

■ **Ediciones**

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria  
Centro Regional Patagonia Norte  
Estación Experimental Agropecuaria Bariloche. "Dr. Grenville Morris"  
biblioteca@bariloche.inta.gov.ar





Ministerio de Agricultura,  
Ganadería y Pesca  
Presidencia de la Nación

## **SIMPAT**

**Sistema de Monitoreo Productivo y Alerta Temprana:  
Dinámica y prospectiva de la productividad de la vegetación en la  
Cuenca Alta del Río Limay**

**DICIEMBRE 2020**

**Elaboración: Easdale M.H. y Bruzzone O.**

**Colaboración: Umaña F., Marciani S.**

**Convenio 27372-1460-INTA-TNC**

Instituto de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (IFAB)

INTA Bariloche – CONICET

Av. Modesta Victoria 4450 (8400),

San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina



El presente es un informe de caracterización de la dinámica y prospectiva de la productividad de la vegetación, estimada a partir de series del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) del período 2000-2020, para el área de estudio de la Alta Cuenca del Río Limay. El mismo se enmarca en el convenio de colaboración técnica entre INTA y TNC N°27372-1460.

### ***Síntesis del estado de situación en el área de estudio de la Cuenca Alta del Río Limay***

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos:

- La productividad de la vegetación muestra una tendencia-cíclica con dos patrones espaciales dominantes (Fig. 1). Por un lado, una recaída incipiente en Brazo Huemul y zona noroeste del área de estudio. Por otro lado, se observa una tendencia-cíclica de recuperación avanzada en las zonas centro y norte, y recaída avanzada en la zona noreste, ésta última asociada al área de Alicurá.
- El Ritmo de Cambio de la tendencia cíclica registra patrones dispares en casi toda el área de estudio (Fig. 2), sugiriendo la existencia de una diversidad de situaciones respecto a la evolución de la dinámica de la vegetación. La información no permite ser concluyentes a escala regional, por lo cual es importante discriminar la situación por zonas.
- Se determinaron seis arquetipos de la dinámica temporal de la productividad de la vegetación: 1. Estepas (dos franjas, una al sur y otra al norte del área estudiada, Fig. 3), 2. Forestación de pinos en Alicurá (Fig. 5), 3. Estepas en Alicurá (Fig. 7), 4.a. Bosque nativo y 4.b. Mallín (Fig. 9), 5. Bosque en Brazo Huemul y franja Lago Traful-Confluencia (Fig. 12), y 6. Estepa, con mayor impacto de cenizas volcánicas (Norte de Ea. San Ramón y zona Villa Llanquín, Fig. 14).
- En los arquetipos 1, 2, 3 y 6 (estepas y forestación) la dinámica temporal de la productividad vegetal estuvo marcada por una fuerte retracción en el año 2011-2012, asociada con la caída de cenizas volcánicas del Complejo Volcánica Caulle-Puyehue, seguida de una rápida recuperación en los arquetipos 1 y 2, y más lenta en los arquetipos 3 y 6. En estas zonas, la dinámica de la vegetación estuvo muy poco correlacionada con variables climáticas, lo que sugiere que estuvo dominada principalmente por factores no climáticos, como el impacto del evento de origen volcánico. En general, los niveles de productividad de los últimos años fueron inferiores a los alcanzados en la década del 2000, con una merma del 20 a 25% en algunas zonas (arquetipo 3 y 6). El movimiento de largo plazo se encuentra en una fase positiva, pero actualmente se ubica en transición hacia una fase negativa. En algunas zonas (e.g. arquetipo 3), el movimiento se sitúa actualmente cercano al umbral de ingreso a una nueva fase negativa de largo plazo. En síntesis, en estas zonas la recuperación posterior a la caída de cenizas volcánicas no permitió alcanzar los valores de productividad registrados en la década del 2000 (se ubican en un escalón inferior) y el escenario actual presenta una transición de largo plazo hacia una fase negativa.
- La dinámica temporal de la productividad vegetal de las zonas asociadas al arquetipo 4 (bosque nativo y mallines) estuvieron marcadas por un movimiento periódico, con alta estacionalidad y sin mayores cambios en los valores medios a lo largo de toda la serie. Dicha dinámica tuvo niveles elevados de correlación positiva con variables de precipitación y temperatura en todo el período analizado, sugiriendo que su comportamiento estuvo principalmente modulado por el clima. El movimiento de largo plazo registró un movimiento ondulante, con fases que duraron entre cuatro y cinco años. Los valores actuales se ubican en una fase positiva, aunque registran tasas comparativamente negativas en comparación con las registradas en años anteriores. Este

escenario sugiere una transición hacia una nueva fase negativa, propia de la oscilación que viene registrando a lo largo de la serie. No se observan cambios en la tendencia general, que se mantiene estable.

- La dinámica temporal de la productividad vegetal de las zonas asociadas al arquetipo 5 (bosque nativo en Brazo Huemul y una franja entre Lago Traful y confluencia entre río Traful y río Limay) registró niveles de productividad muy elevados, con mermas en 2009-2010 y en 2019-2020, con muy baja correlación con variables climáticas. El movimiento de largo plazo registró un movimiento ondulante, con fases que duraron entre cinco y seis años. Los valores del año 2020 se ubicaron en el inicio de una fase negativa, enmarcada en una transición negativa que se acentuó en los últimos dos años. De todas maneras, no se observan cambios en la tendencia general, la cual se mantiene estable.

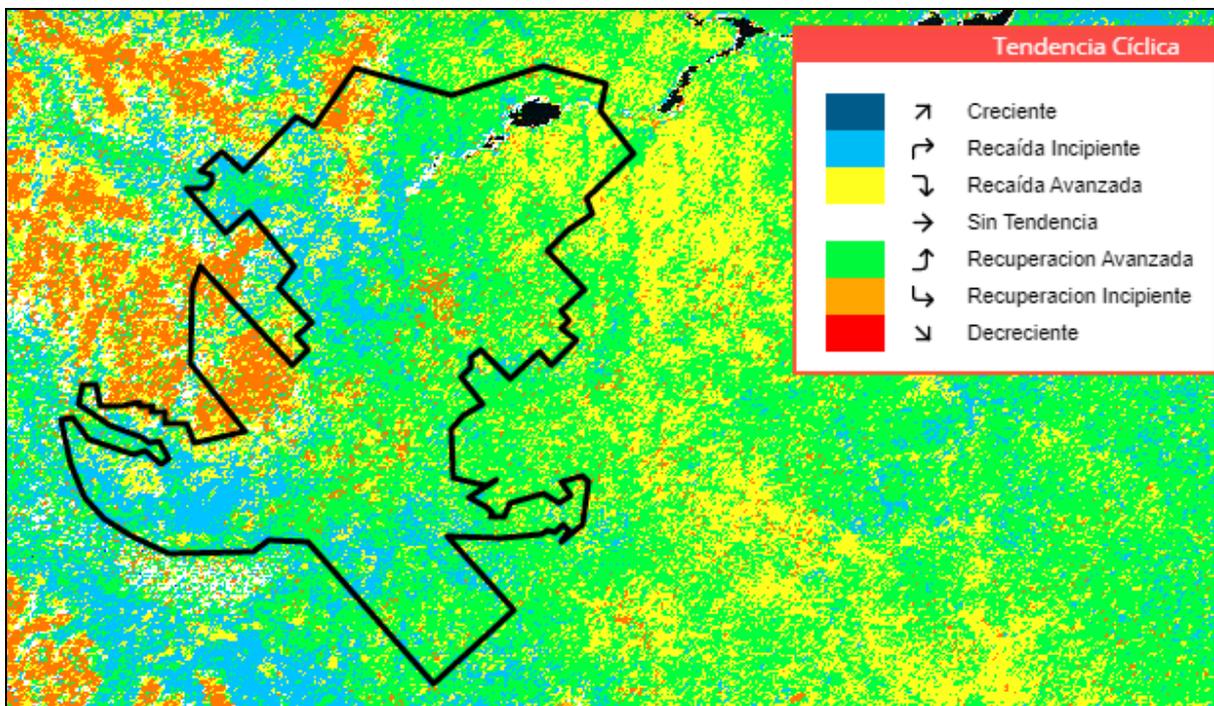


Figura 1. Tendencia cíclica en el área de estudio. Las líneas negras identifican límites de la cuenca alta del Río Limay. Referencia de colores de Ciclos de Tendencia: Creciente (azul ■), Recaída Incipiente (turquesa ■), Recaída Avanzada (amarillo ■), Decreciente (rojo ■), Recuperación Incipiente (naranja ■), Recuperación Avanzada (verde ■), Sin Ciclo de Tendencia (blanco).

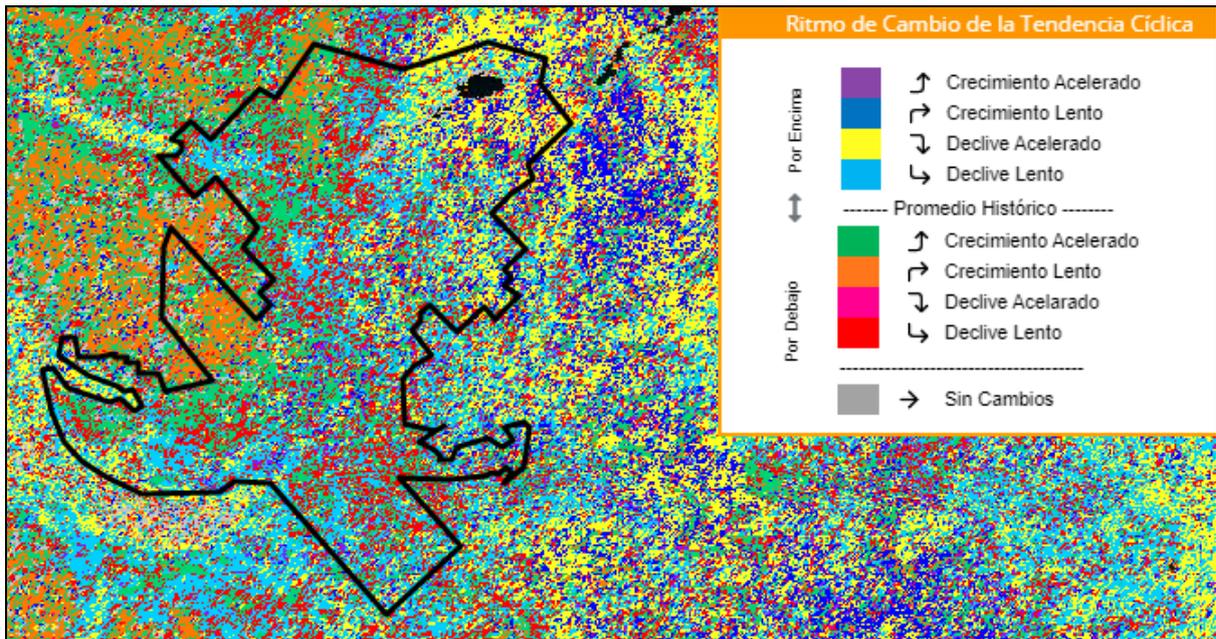


Figura 2. Ritmo de cambio de la Tendencia Cíclica en el área de estudio de la cuenca alta del Río Limay (línea negra). Referencias: 1. *Valores por encima del promedio*: Crecimiento acelerado (sentido positivo y con tasa positiva, violeta ■), Crecimiento lento (sentido positivo y con tasa negativa, azul ■), Declive lento (sentido negativo y con tasa positiva, turquesa ■), Declive acelerado (sentido negativo y con tasa negativa, amarillo ■). 2. *Valores por debajo del promedio*: Crecimiento acelerado (sentido positivo y con tasa positiva, verde ■), Crecimiento lento (sentido positivo y con tasa negativa, marrón claro ■), Declive lento (sentido negativo y con tasa positiva, rojo ■), Declive acelerado (sentido negativo y con tasa negativa, magenta ■); Sin cambios (sentido neutro y tasa de cambio neutro, gris ■).

*Escenarios basados en arquetipos de la dinámica temporal de la vegetación en la Cuenca Alta del Río Limay*

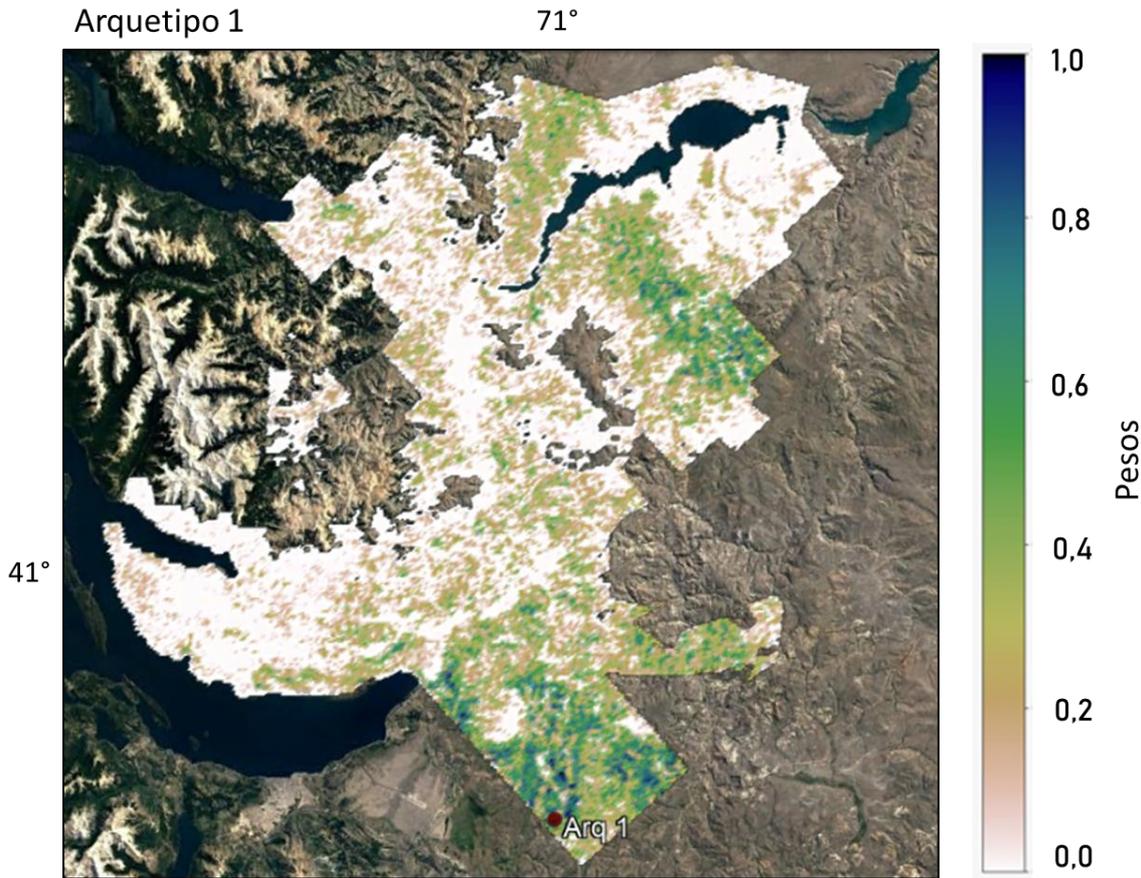


Figura 3. Ubicación geográfica de los píxeles con más peso y el más representativo del arquetipo 1.

El arquetipo 1 estuvo asociado a zonas de estepa, ubicadas al sur (Estancia San Ramón) y en una franja al norte del área de estudio (Fig. 3). La dinámica temporal de la productividad vegetal estuvo marcada por una fuerte retracción en el año 2011-2012 asociada con la caída de cenizas volcánicas del Complejo Volcánica Caille-Puyehue, seguida de una rápida recuperación (Fig. 4). Este patrón se evidencia en las frecuencias bajas (ciclos mayores a cuatro años, Fig. 18C). Sin embargo, los niveles de productividad de los últimos años siguen siendo inferiores a los alcanzados en la década 2000-2010, en concordancia con una reducción de la amplitud del ciclo anual (Fig. 18E) y de fenómenos intra-anales (Fig. 18F). El movimiento de largo plazo registra una fase predominantemente negativa para el período 2000-2015, con pulsos negativos en 2005-2006, 2007-2008 y 2011-2012. El cambio a una fase positiva acontece en el año 2016, la cual aún se mantiene, aunque en los últimos dos años se observa una transición negativa (Fig. 4).

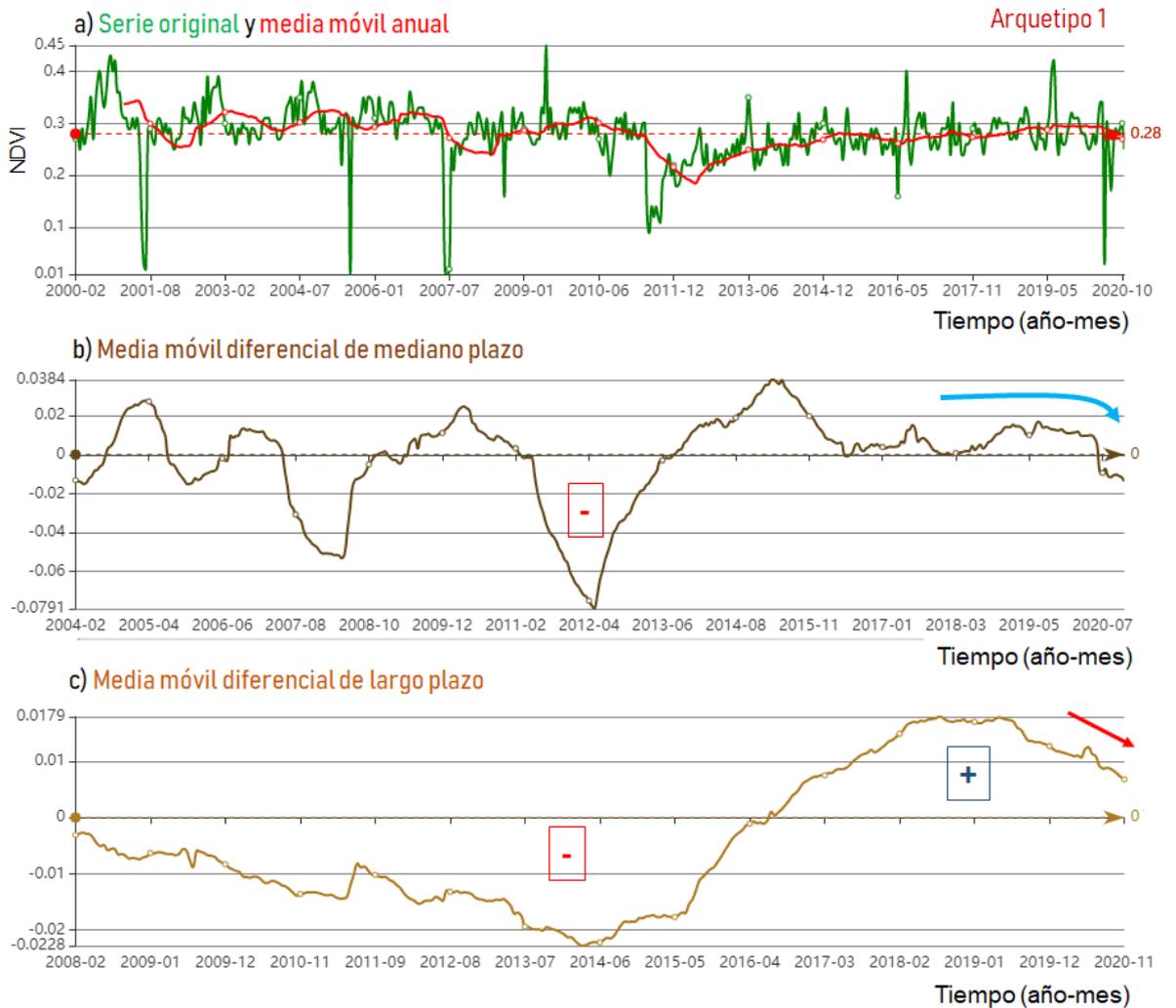


Figura 4. Análisis de series temporales de NDVI del píxel más representativo del arquetipo 1: a) Serie de tiempo original (verde) y media móvil anual (rojo), b) Media móvil diferencial de mediano plazo (diferencia entre la media móvil anual y media móvil de cuatro años), c) Media móvil diferencial de largo plazo (diferencia entre la media móvil de cuatro años y media móvil de ocho años).

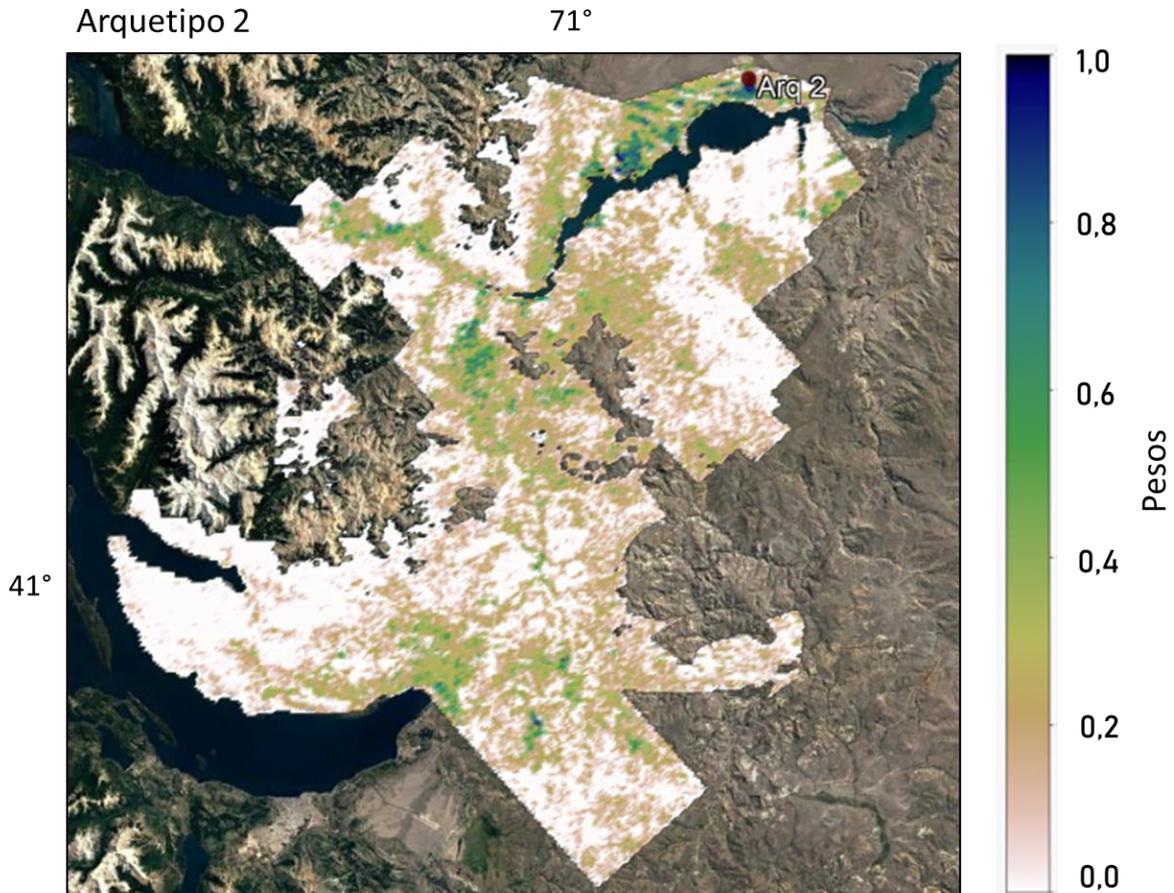


Figura 5. Ubicación geográfica de los píxeles con más peso y el más representativo del arquetipo 2.

El arquetipo 2 estuvo asociado a zonas de forestaciones, ubicadas principalmente en la zona norte (Alicurá), al norte del espejo de agua (Fig. 5).

La dinámica temporal de la productividad vegetal estuvo marcada por una fuerte retracción en el año 2011-2012 asociada con la caída de cenizas volcánicas del Complejo Volcánica Cautle-Puyehue, seguida de una recuperación posterior, que alcanza su máximo en 2014-2015 (Fig. 6). Este patrón se evidencia claramente en las frecuencias bajas (ciclos mayores a cuatro años, Fig. 19C) pero sin cambios en la tendencia, que se expresó levemente alcista en todo el período (Fig. 19B). La amplitud del ciclo anual aumentó hacia la segunda década del período analizado (Fig. 19E). El movimiento de largo plazo registra una fase negativa para el período 2012-2016, la cual fue generada por el evento intensamente negativo de 2011-2012. El cambio a una fase positiva acontece en el año 2016, la cual aún se mantiene hasta la actualidad, aunque en los últimos dos años se observa una transición negativa (Fig. 6).

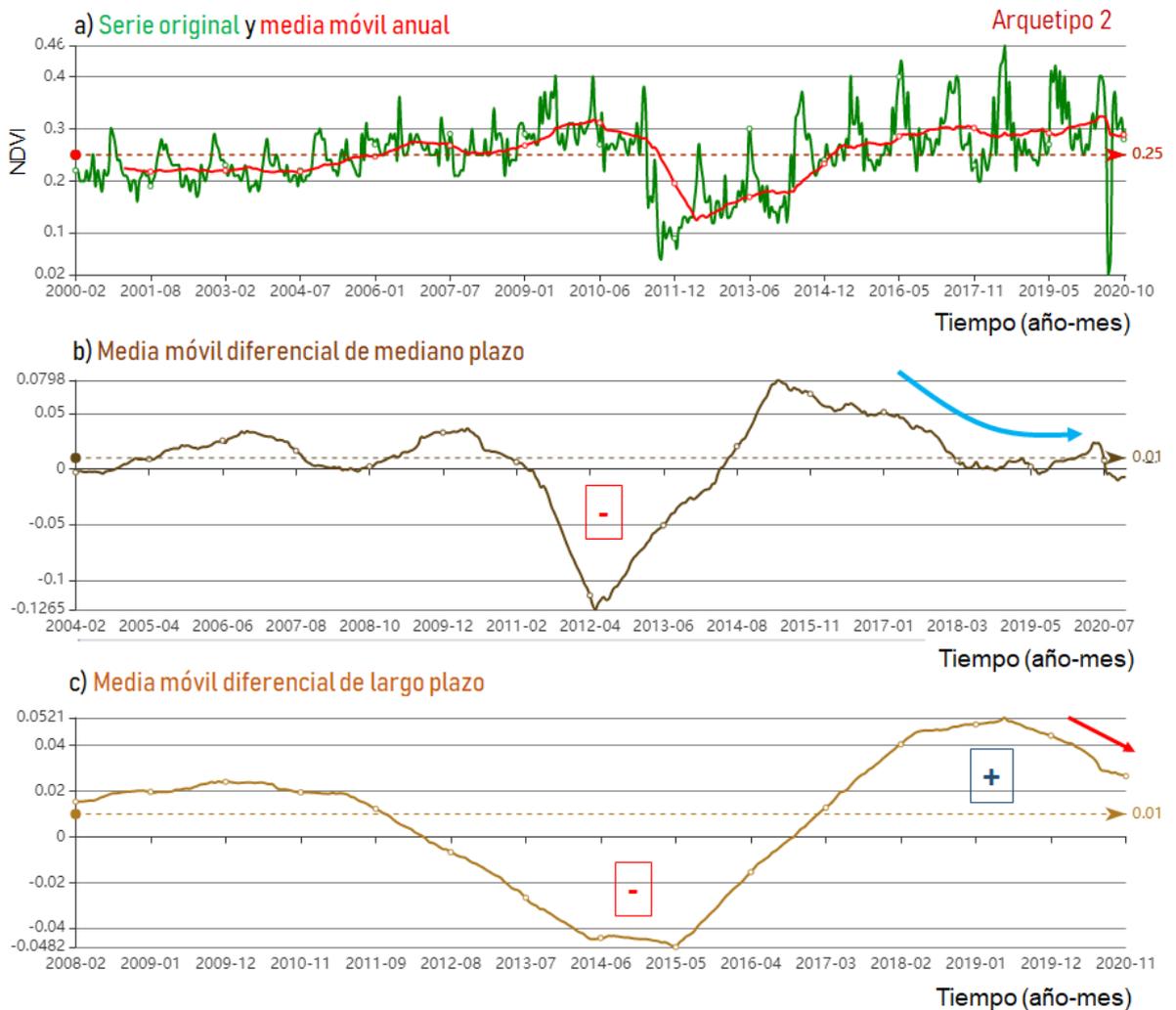


Figura 6. Análisis de series temporales de NDVI del píxel más representativo del arquetipo 1: a) Serie de tiempo original (verde) y media móvil anual (rojo), b) Media móvil diferencial de mediano plazo (diferencia entre la media móvil anual y media móvil de cuatro años), c) Media móvil diferencial de largo plazo (diferencia entre la media móvil de cuatro años y media móvil de ocho años).

Arquetipo 3

71°

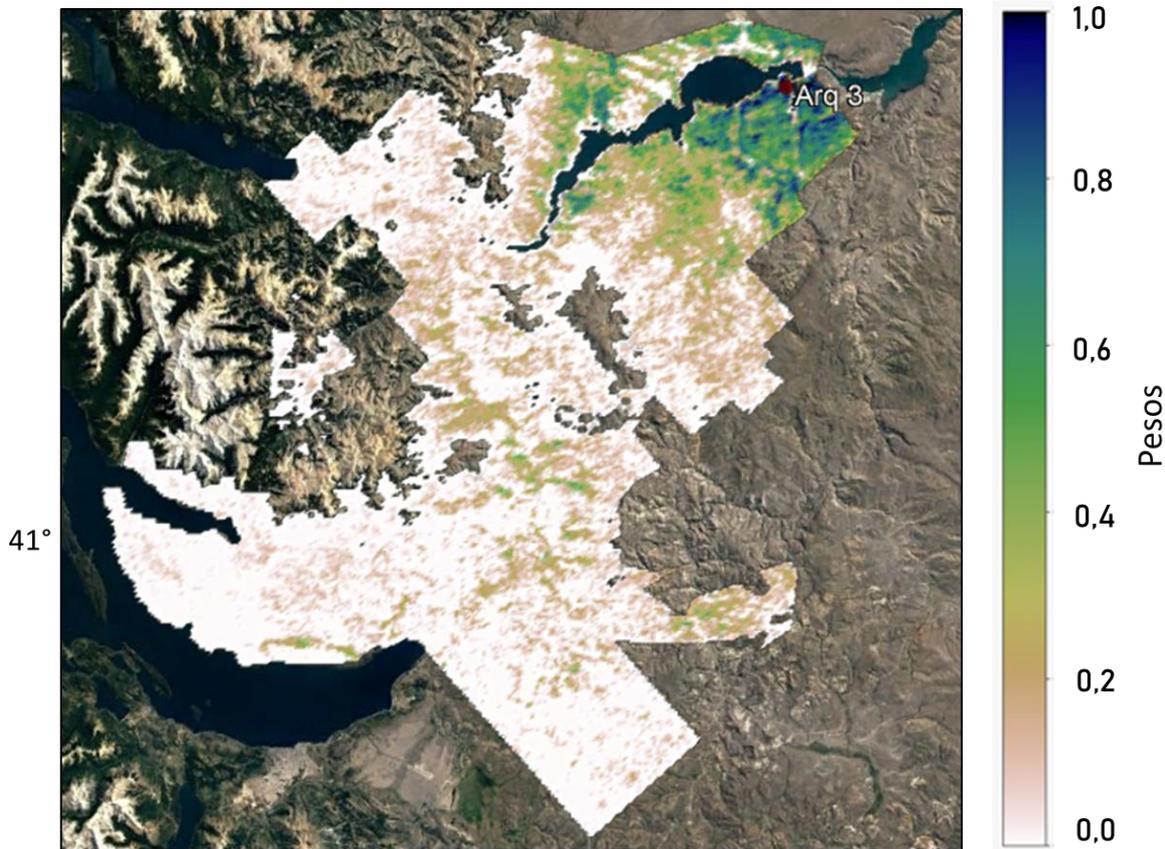


Figura 7. Ubicación geográfica de los píxeles con más peso y el más representativo del arquetipo 3.

El arquetipo 3 estuvo asociado a zonas de estepa, ubicadas en la zona norte del área de estudio (Alicurá), predominantemente al sur y en torno al espejo de agua (Fig. 7).

La dinámica temporal de la productividad vegetal estuvo marcada por una fuerte retracción en el año 2011-2012 asociada con la caída de cenizas volcánicas del Complejo Volcánica Cautín-Puyehue, evidenciada en las frecuencias bajas (ciclos mayores a cuatro años, Fig. 20C) y altas (intra-anual) (Fig. 20F). La recuperación posterior alcanza su máximo en 2014-2015, seguida de una retracción lenta y progresiva en los años subsiguientes (Fig. 8).

El movimiento de largo plazo registra una fase predominantemente negativa para el período 2000-2016, la cual fue generada por una lenta pero progresiva merma en la productividad durante la primera década, que encontró en el evento intensamente negativo de 2011-2012 su menor valor. El cambio a una fase positiva acontece en el año 2016 y registra un máximo en 2018, a partir del cual se confirma una transición negativa acelerada (Fig. 8). Actualmente se ubica en el umbral de ingreso a una nueva fase negativa de largo plazo y los valores actuales de productividad máxima son un 20% inferiores a los registrados durante la década 2000-2010.

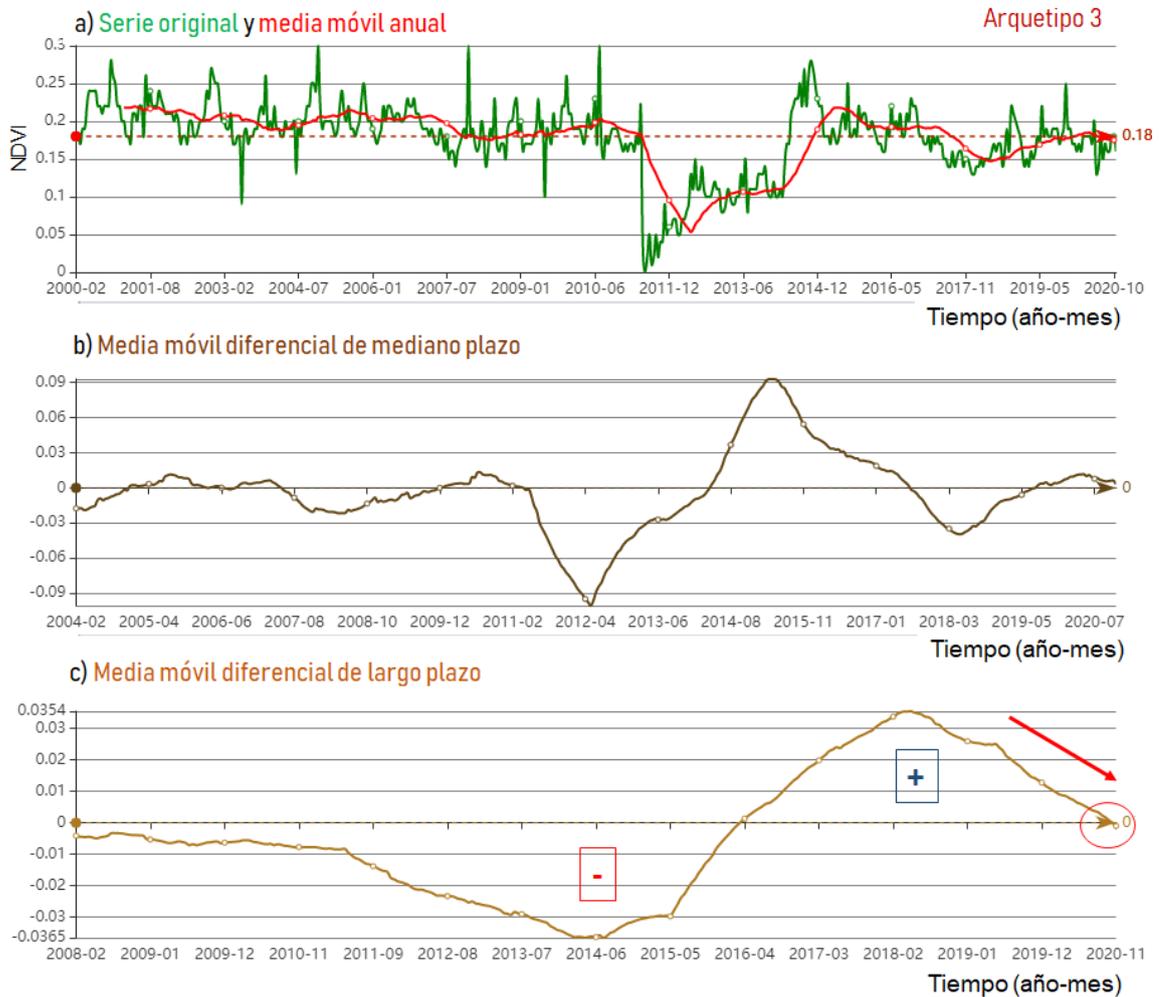


Figura 8. Análisis de series temporales de NDVI del píxel más representativo del arquetipo 3: a) Serie de tiempo original (verde) y media móvil anual (rojo), b) Media móvil diferencial de mediano plazo (diferencia entre la media móvil anual y media móvil de cuatro años), c) Media móvil diferencial de largo plazo (diferencia entre la media móvil de cuatro años y media móvil de ocho años).

Arquetipo 4

71°

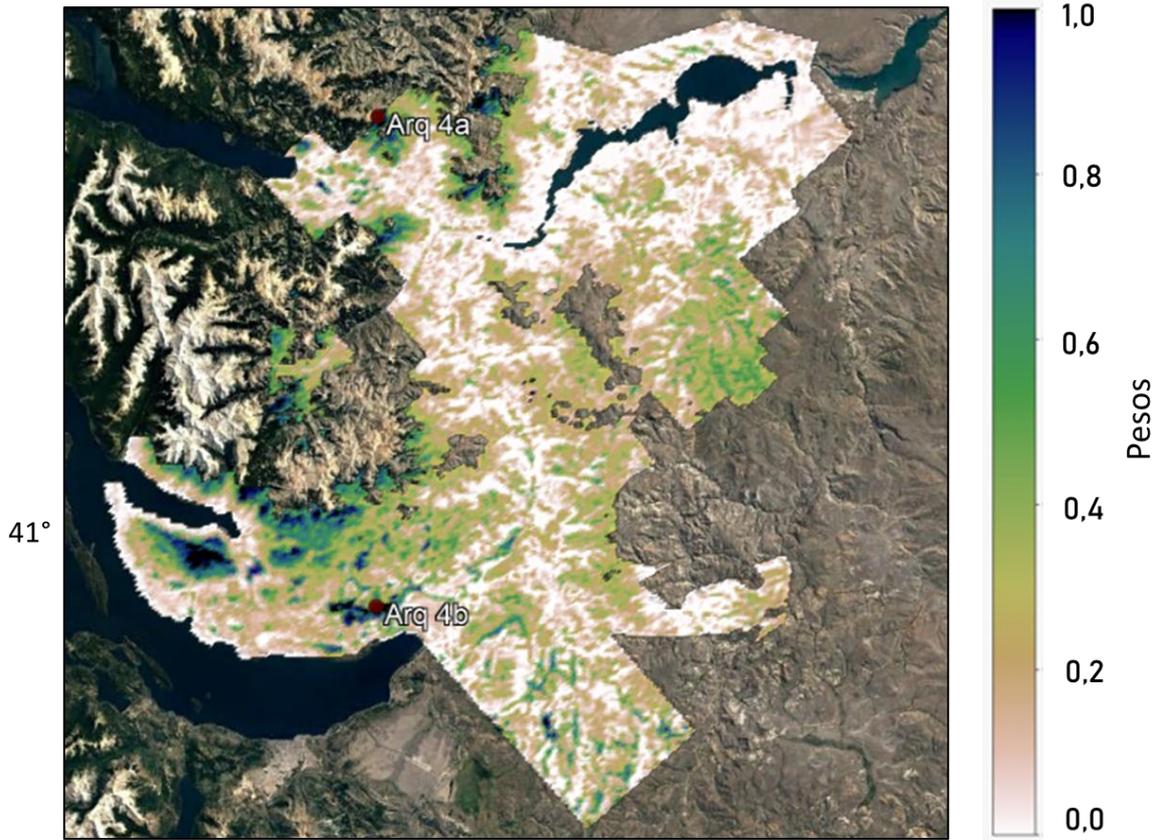


Figura 9. Ubicación geográfica de los píxeles con más peso y los dos más representativos del arquetipo 4, identificados con letras a y b.

El arquetipo 4 estuvo asociado a dos zonas con un funcionamiento temporal similar: 4.a) Bosque nativo, y 4.b) Mallín (Fig. 9).

La dinámica temporal de la productividad vegetal estuvo marcada por un movimiento periódico con alta estacionalidad, sin mayores cambios en la tendencia de largo plazo (Fig. 21 y 22). Una leve merma en la tasa de la productividad y en la amplitud del ciclo anual se registró en los años 2015-2016, la cual se recuperó rápidamente en años siguientes (Fig. 10). En el caso del mallín, se observa una leve afectación en el año 2011, asociada a la caída de ceniza volcánica, aunque de muy rápida recuperación posterior (Fig. 11).

El movimiento de largo plazo registra un movimiento ondulante, con fases que duraron entre cuatro y cinco años. En el caso del bosque de altura, se registró una fase negativa para el período 2015-2019, seguida por una fase positiva entre 2019 y fines de 2020. Los valores actuales registran tasas comparativamente negativas a las registradas en años anteriores, confirmando una transición negativa que se ubica cercana al cruce hacia una nueva fase negativa (4.a, Fig. 10) En el caso del mallín, el movimiento de largo plazo registró una fase negativa entre 2010-2015 y una fase positiva consolidada entre 2018-2020 (4.b, Fig. 11).

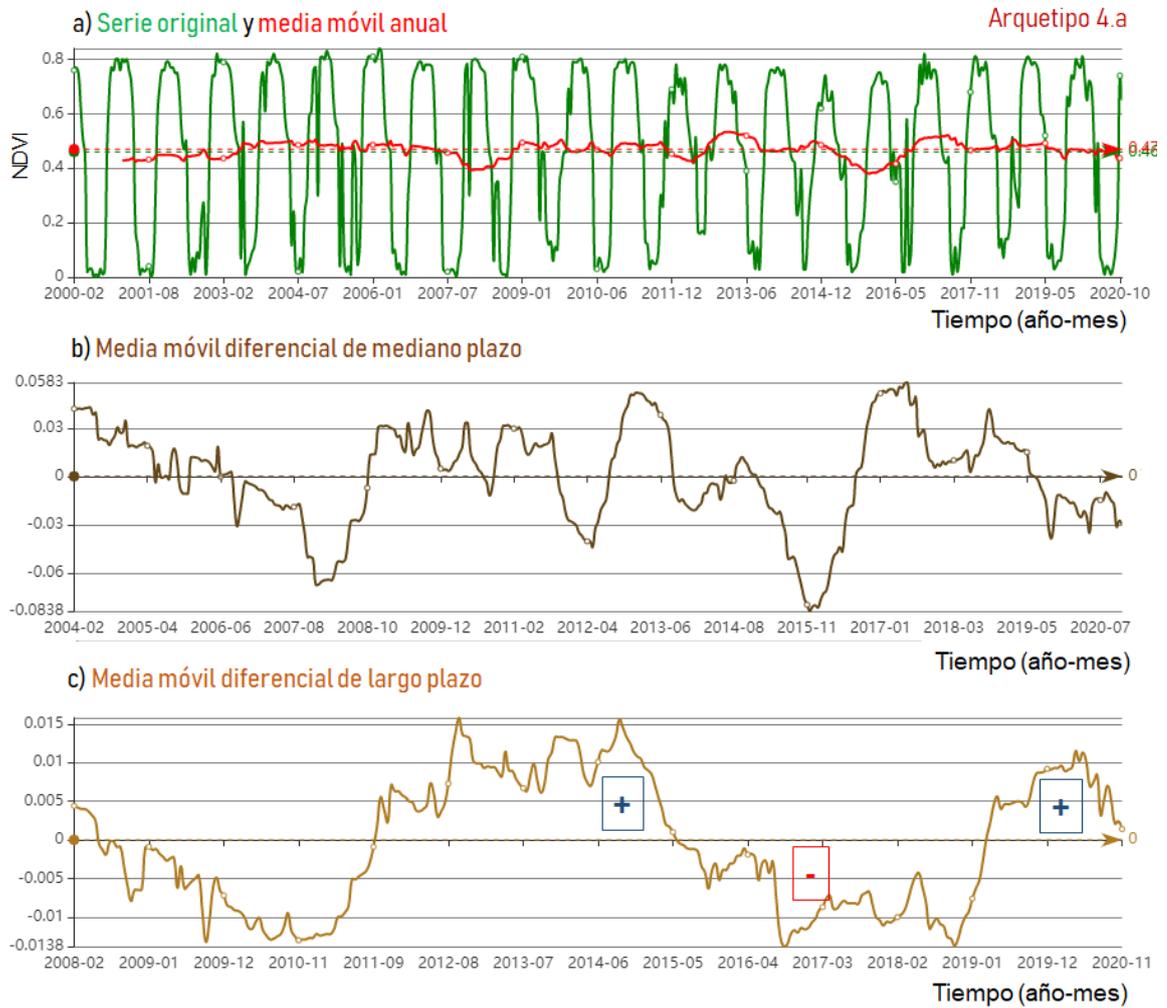


Figura 10. Análisis de series temporales de NDVI del píxel más representativo del arquetipo 4.a: a) Serie de tiempo original (verde) y media móvil anual (rojo), b) Media móvil diferencial de mediano plazo (diferencia entre la media móvil anual y media móvil de cuatro años), c) Media móvil diferencial de largo plazo (diferencia entre la media móvil de cuatro años y media móvil de ocho años).

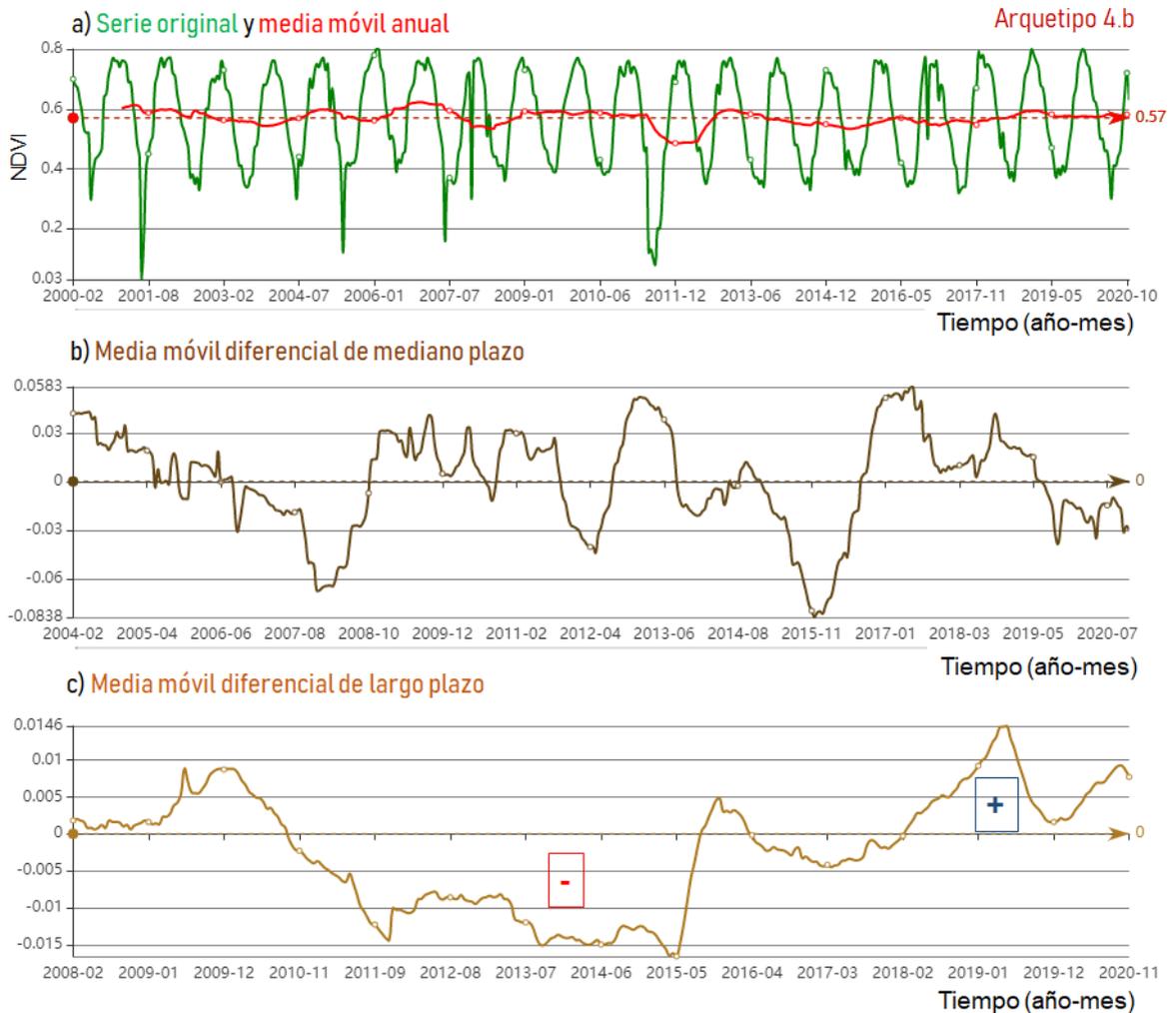


Figura 11. Análisis de series temporales de NDVI del píxel más representativo del arquetipo 4.b: a) Serie de tiempo original (verde) y media móvil anual (rojo), b) Media móvil diferencial de mediano plazo (diferencia entre la media móvil anual y media móvil de cuatro años), c) Media móvil diferencial de largo plazo (diferencia entre la media móvil de cuatro años y media móvil de ocho años).

Arquetipo 5

71°

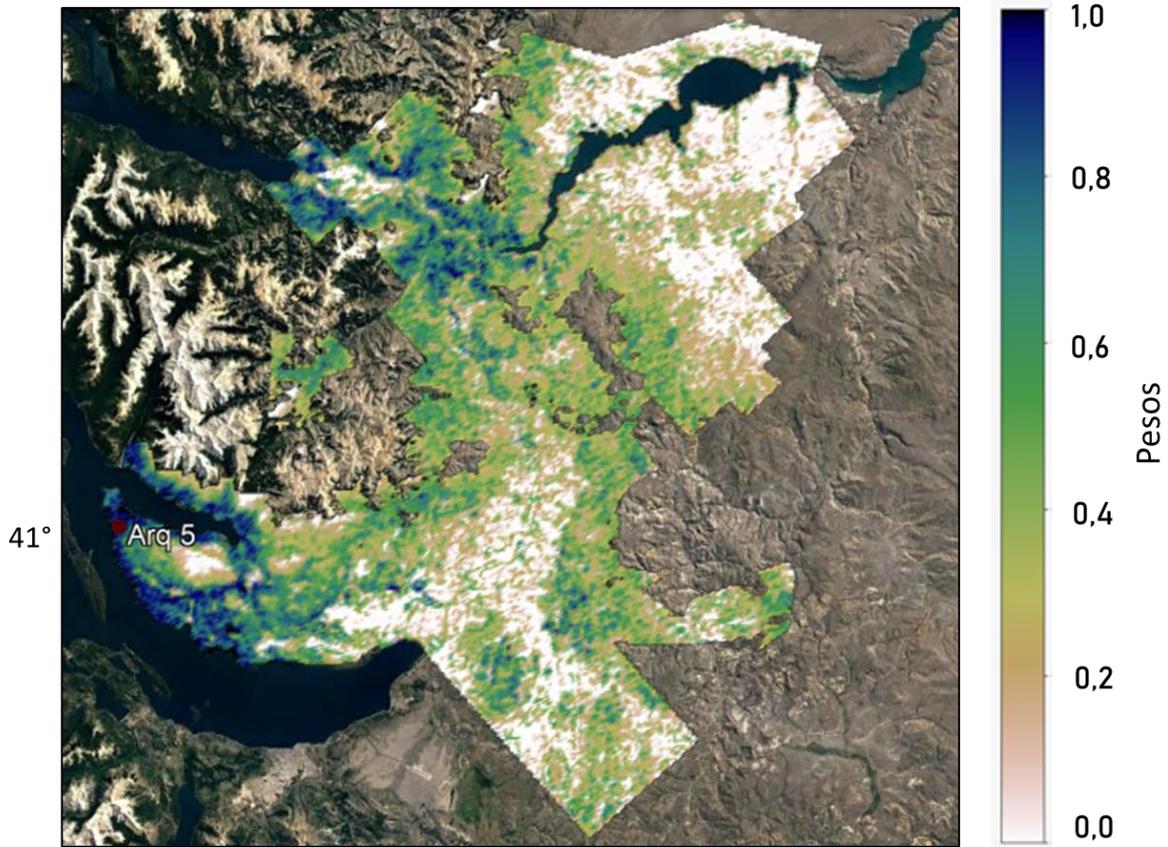


Figura 12. Ubicación geográfica de los píxeles con más peso y el más representativo del arquetipo 5.

El arquetipo 5 estuvo asociado a la zona de Brazo Huemul y en torno al río Traful y río Cuyín Manzano, en una franja entre el Lago Traful y confluencia de los ríos Traful y Limay (Fig. 12), con niveles de productividad muy elevados, registrando mermas en 2009-2010 y en 2019-2020. La dinámica estuvo dominada por frecuencias altas (eventos intra-anales, Fig. 23F) y ruido no correlacionado (Fig. 23G), sin cambios en la tendencia general (Fig. 23B). La media móvil de la productividad de los últimos dos años se ubicó por debajo de toda la serie, con tasa negativa de mediano plazo (Fig. 13).

El movimiento de largo plazo registró un movimiento ondulante, con fases que duraron entre cinco y seis años. Se registró una fase negativa para el período 2008-2013, seguida por una fase positiva para el período 2013-2019. Los valores del año 2020 se ubicaron ya en el inicio de una fase negativa, enmarcada en una transición negativa que se acentuó en los últimos dos años analizados (Fig. 13).

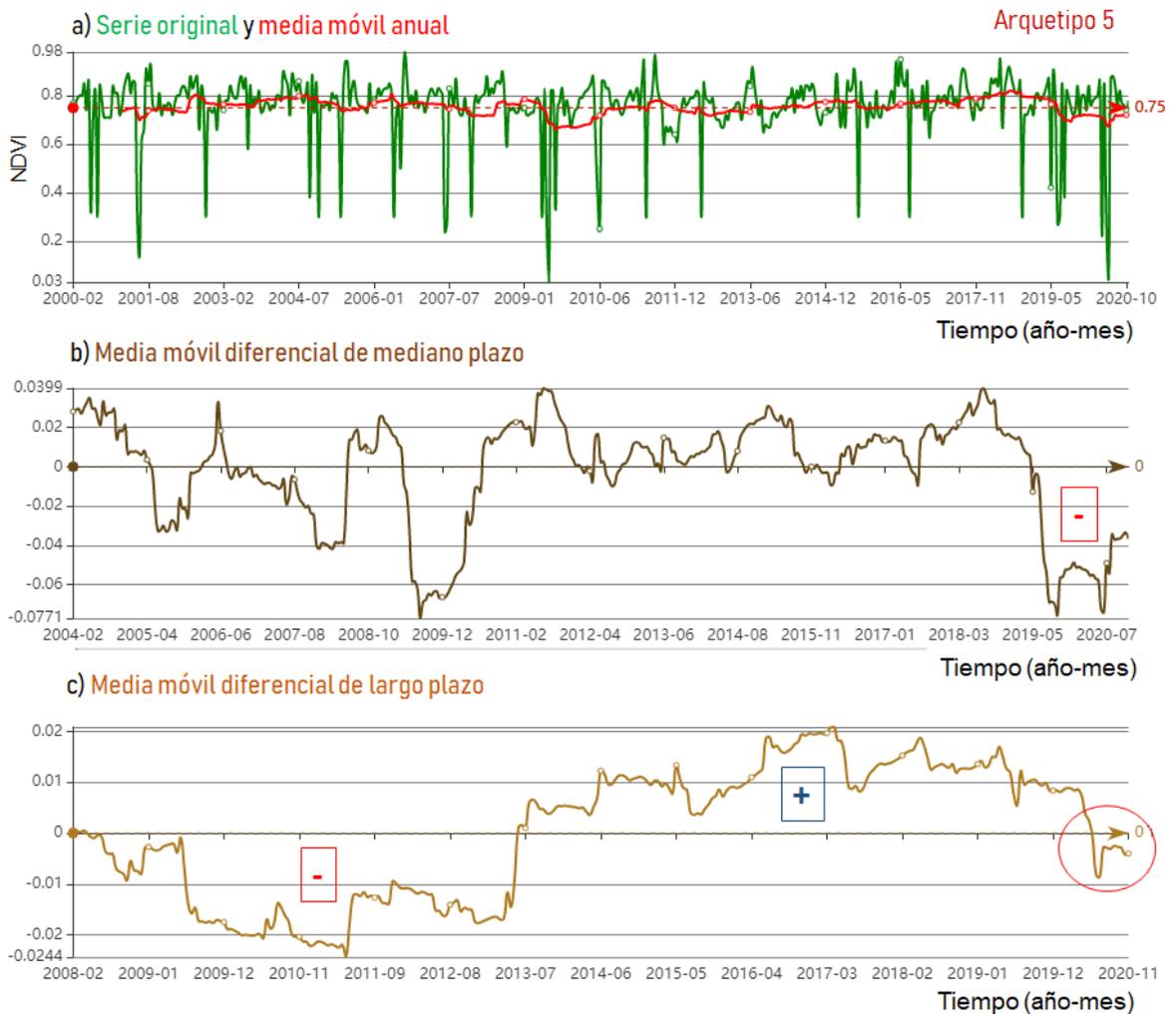


Figura 13. Análisis de series temporales de NDVI del píxel más representativo del arquetipo 5: a) Serie de tiempo original (verde) y media móvil anual (rojo), b) Media móvil diferencial de mediano plazo (diferencia entre la media móvil anual y media móvil de cuatro años), c) Media móvil diferencial de largo plazo (diferencia entre la media móvil de cuatro años y media móvil de ocho años).

Arquetipo 6

71°

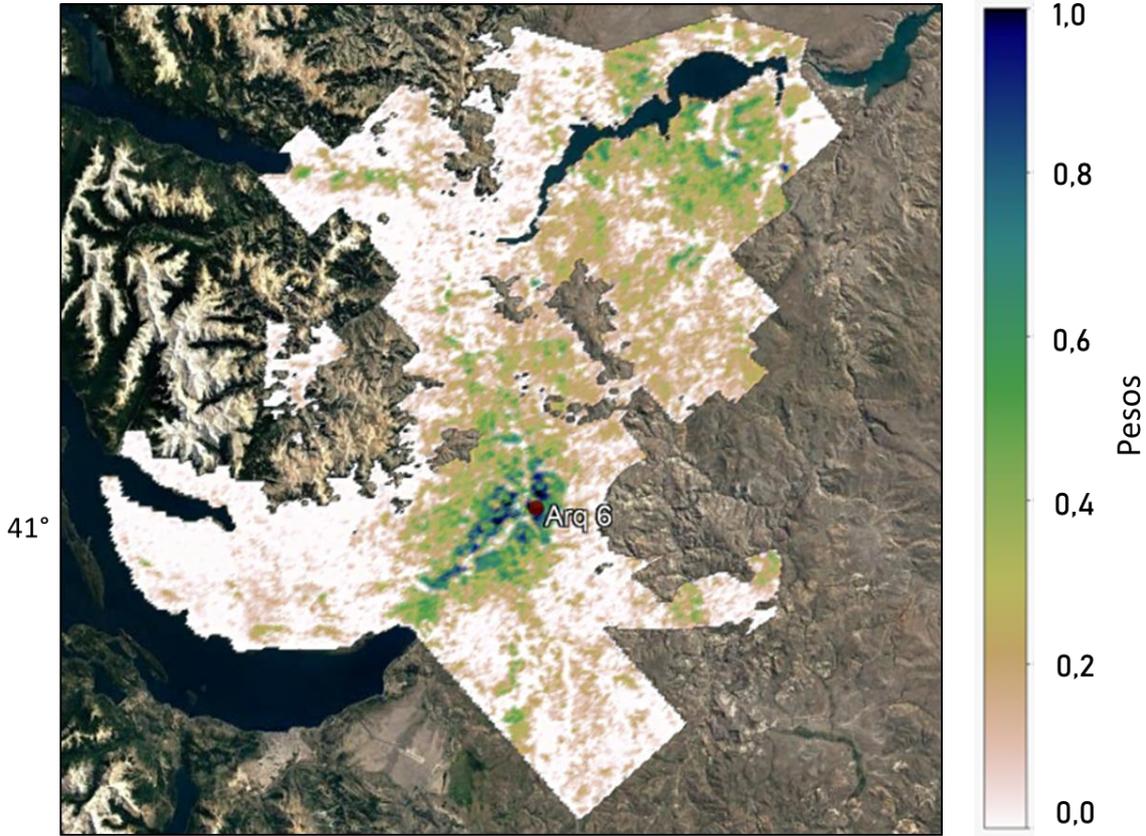


Figura 14. Ubicación geográfica de los píxeles con más peso y el más representativo del arquetipo 6.

El arquetipo 6 estuvo asociado a zonas de estepa, ubicadas en ambas laderas de la naciente y cuenca alta del Río Limay (zona de Villa Llanquín) (Fig. 14).

La dinámica temporal de la productividad vegetal estuvo marcada por una fuerte retracción en el año 2011-2012 asociada con la caída de cenizas volcánicas del Complejo Volcánica Cautín-Puyehue, evidenciado tanto en la tendencia a largo plazo (Fig. 24B) como en frecuencias bajas (Fig. 24C). La recuperación posterior ha sido progresiva pero muy lenta. Los valores medios de los últimos años están aún muy por debajo de los valores registrados en el período 2000-2010 (Fig. 15), configurando una estabilización en un nivel productivo inferior al precedente.

El movimiento de largo plazo registra una fase predominantemente negativa para el período 2000-2018, la cual fue generada por una lenta pero progresiva merma en la productividad durante la primera década, que encontró en el evento intenso de 2011-2012 un impacto negativo, que perduró en lo año siguientes. El cambio a una fase positiva acontece en el año 2017 y registra un máximo en 2019, a partir del cual se mantiene en un nivel levemente descendiente (Fig. 15). Si bien el movimiento se ubica en una fase positiva de largo plazo, los valores actuales de productividad media son un 25% inferiores a los registrados durante la década 2000-2010.

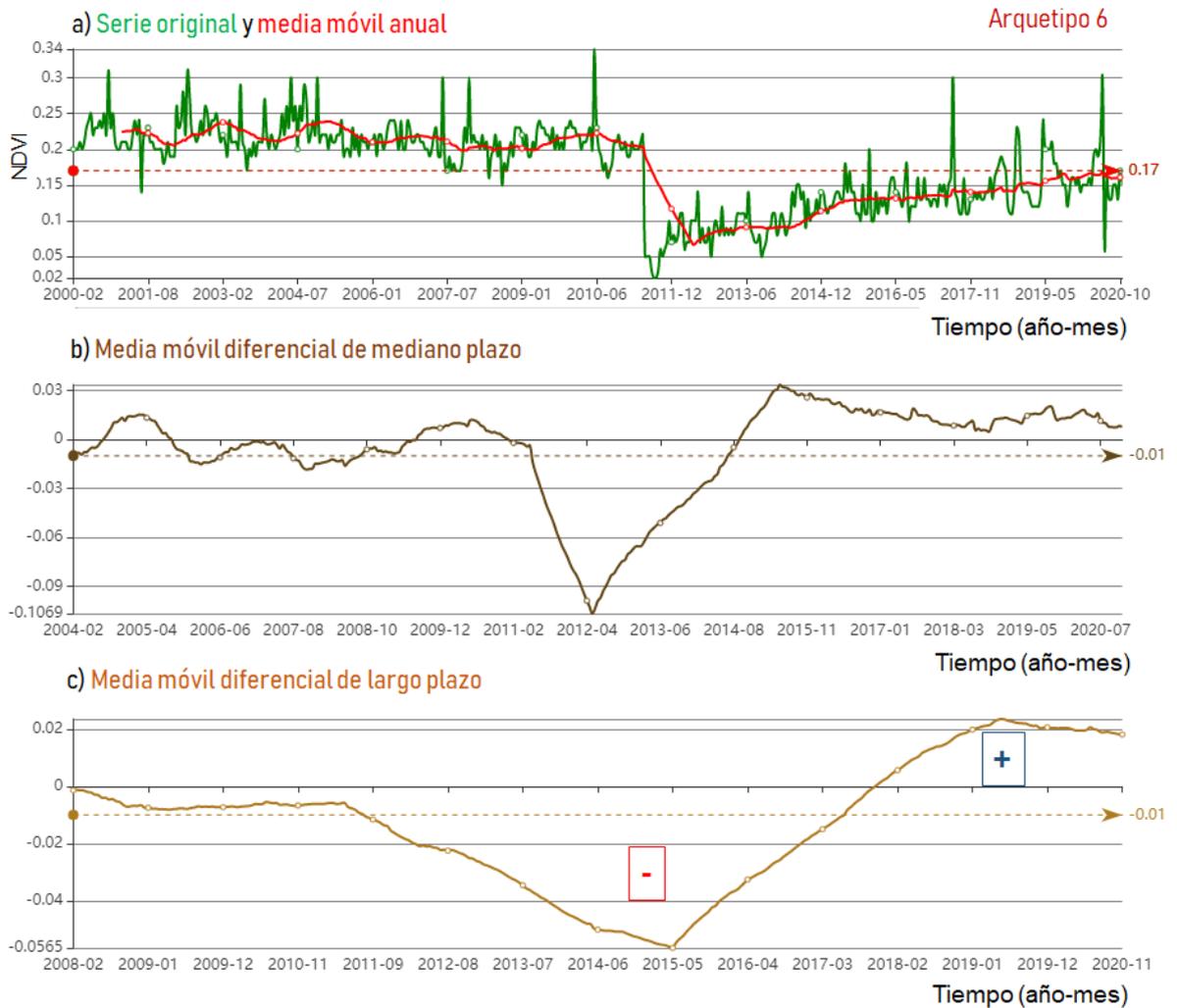


Figura 15. Análisis de series temporales de NDVI del píxel más representativo del arquetipo 6: a) Serie de tiempo original (verde) y media móvil anual (rojo), b) Media móvil diferencial de mediano plazo (diferencia entre la media móvil anual y media móvil de cuatro años), c) Media móvil diferencial de largo plazo (diferencia entre la media móvil de cuatro años y media móvil de ocho años).

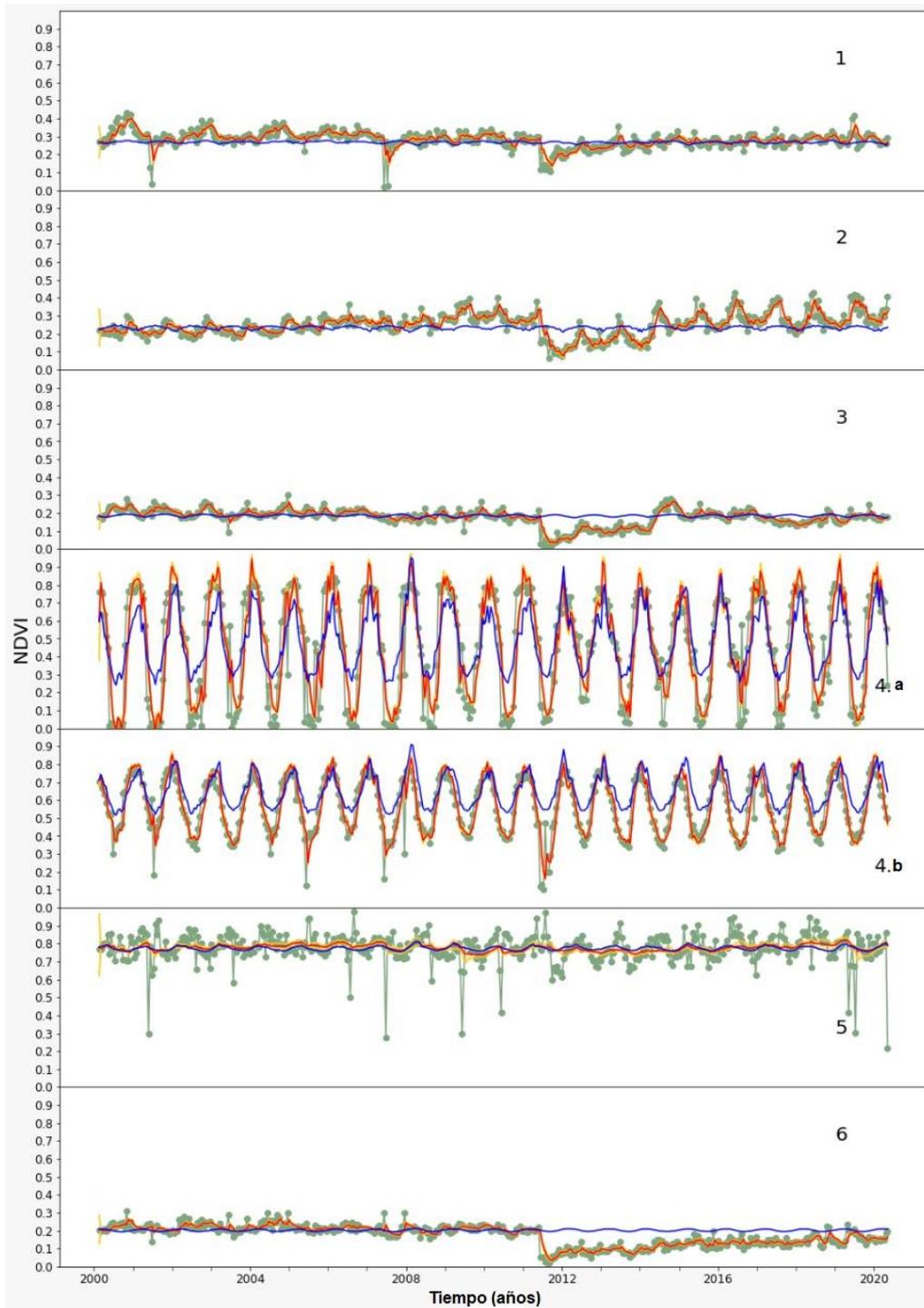


Figura 16. Serie original (puntos y líneas verdes), modelo ajustado (rojo), varianza explicada por variables climáticas: precipitaciones y temperaturas (azul), para el período 2000-2020.

La correlación entre variables climáticas (precipitación y temperatura) y la dinámica temporal de la productividad los píxeles más representativos de los arquetipos obtenidos (Fig. 16), es alta sólo en el arquetipo 4 ( $r^2=0,6$  a  $0,8$ ; Fig. 17), sugiriendo una mayor influencia del clima sobre algunas zonas de bosque y mallines del área de estudio. El resto de los arquetipos registró valores bajos de correlación ( $r^2 < 0,2$ ) a lo largo de todo el período analizado. Estos patrones sugieren que, a escala regional, otros factores no climáticos tuvieron mayor impacto en la



dinámica de la productividad de la vegetación. Entre dichos factores, la caída de ceniza volcánica del Complejo Volcánico Caulle Puyehue en 2011 representó un disturbio muy relevante, que afectó la productividad en el corto y largo plazo en la mayoría de las zonas. Una excepción podría marcarse en algunos casos y durante algunos períodos, que presentaron correlaciones clima-NDVI en niveles intermedios ( $r^2=0,3$  a  $0,4$ ): a) arquetipo 3 entre 2005-2007 y b) arquetipo 2 entre 2018-2020. Ambos arquetipos se ubican en la zona norte del área de estudio, en torno al embalse Alicura. En particular, la correlación se incrementa en los últimos años en las zonas con forestaciones (arquetipo 2), lo cual podría estar indicando una incidencia creciente de las precipitaciones y temperaturas en la productividad de las mismas, luego de un período de baja influencia debido a una fase duradera de sequía. Este comportamiento no se observó en la estepa aledaña (arquetipo 3).

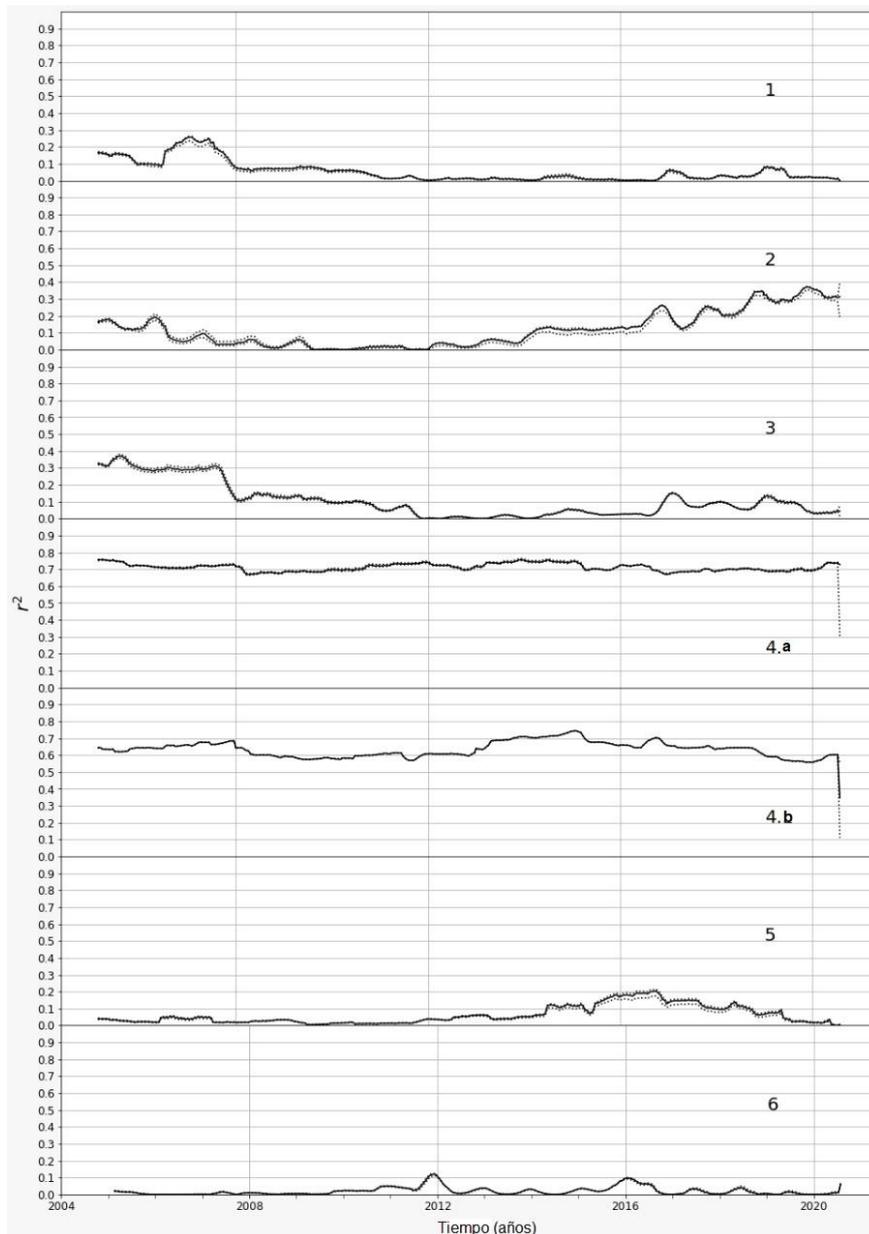


Figura 17. Correlación ( $r^2$ ) entre variables climáticas (precipitación y temperatura) y serie de NDVI para los píxeles más representativos de los arquetipos funcionales de vegetación para el período 2005-2020.

*Componentes de frecuencia de la dinámica temporal de NDVI, para cada arquetipo*

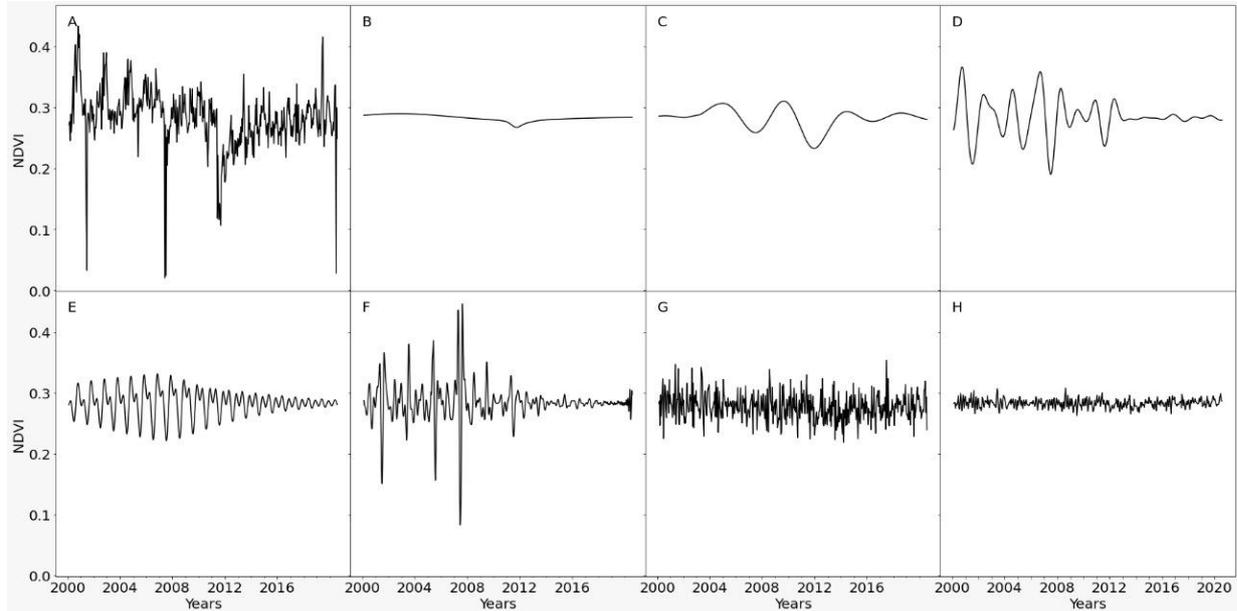


Figura 18. Dinámica temporal del NDVI del arquetipo 1 (A, serie original), descompuesta en distintos componentes de frecuencia: B) Tendencia, C) Frecuencias bajas (> 4 años), D) Frecuencias medias (> 1 año y < 4 años), E) Ciclo anual, F) Frecuencias altas (< 1 año), G) Ruido no correlacionado, H) Ruido auto-correlacionado.

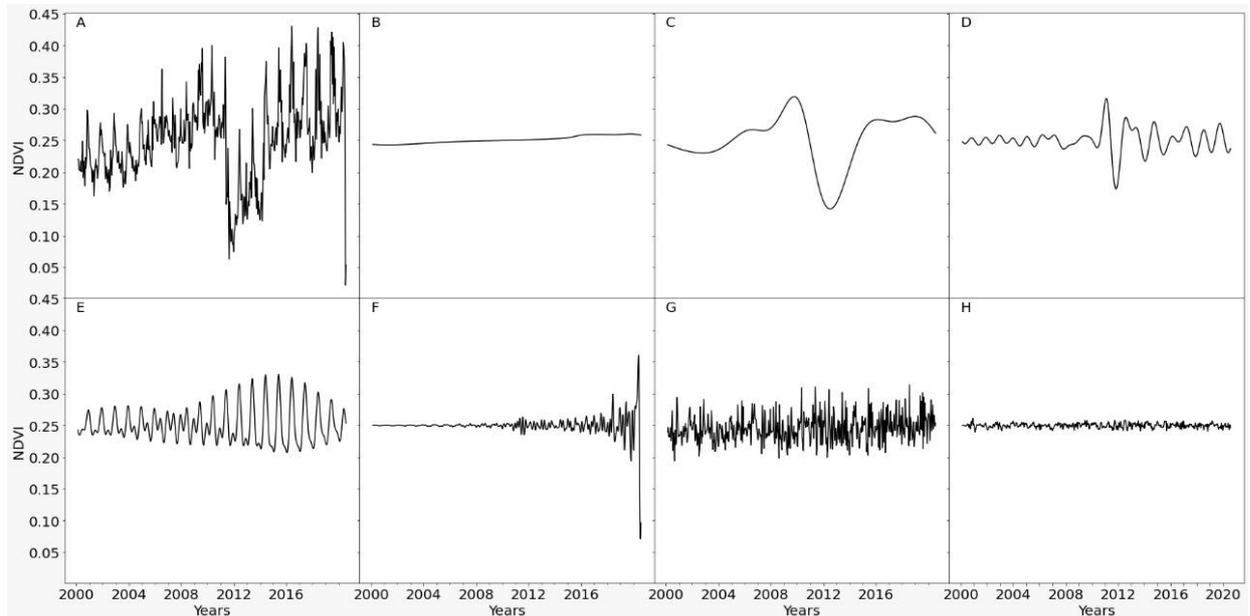


Figura 19. Dinámica temporal del NDVI del arquetipo 2 (A, serie original), descompuesta en distintos componentes de frecuencia: B) Tendencia, C) Frecuencias bajas (> 4 años), D) Frecuencias medias (> 1 año y < 4 años), E) Ciclo anual, F) Frecuencias altas (< 1 año), G) Ruido no correlacionado, H) Ruido auto-correlacionado.

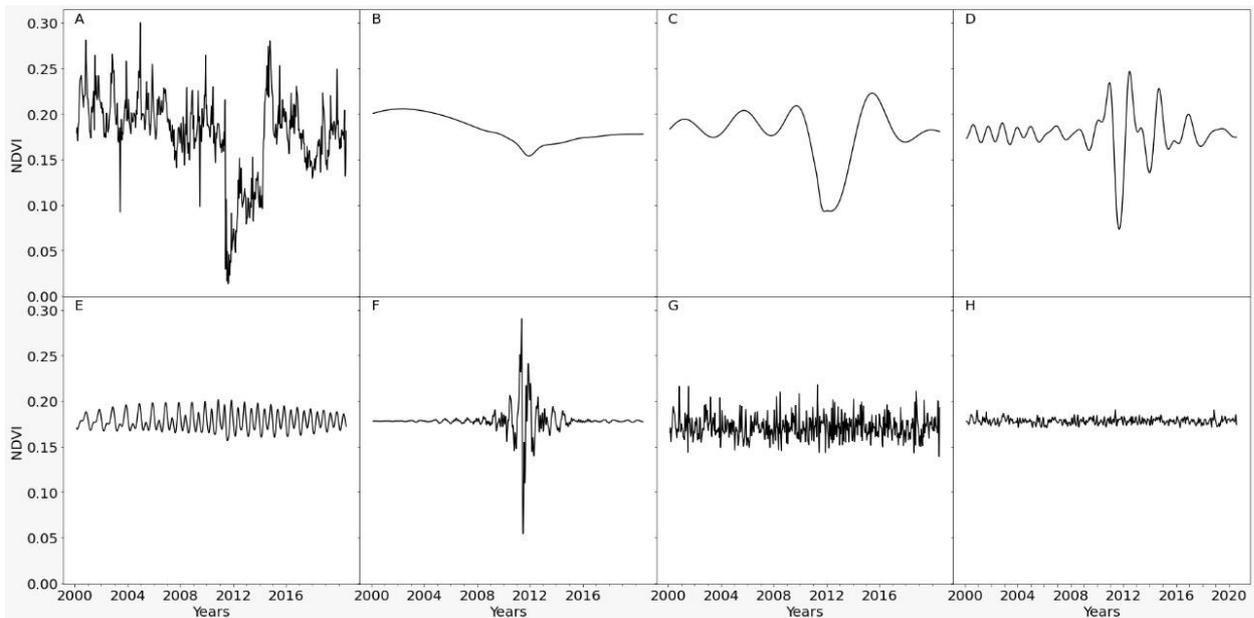


Figura 20. Dinámica temporal del NDVI del arquetipo 3 (A, serie original), descompuesta en distintos componentes de frecuencia: B) Tendencia, C) Frecuencias bajas ( $> 4$  años), D) Frecuencias medias ( $> 1$  año y  $< 4$  años), E) Ciclo anual, F) Frecuencias altas ( $< 1$  año), G) Ruido no correlacionado, H) Ruido auto-correlacionado.

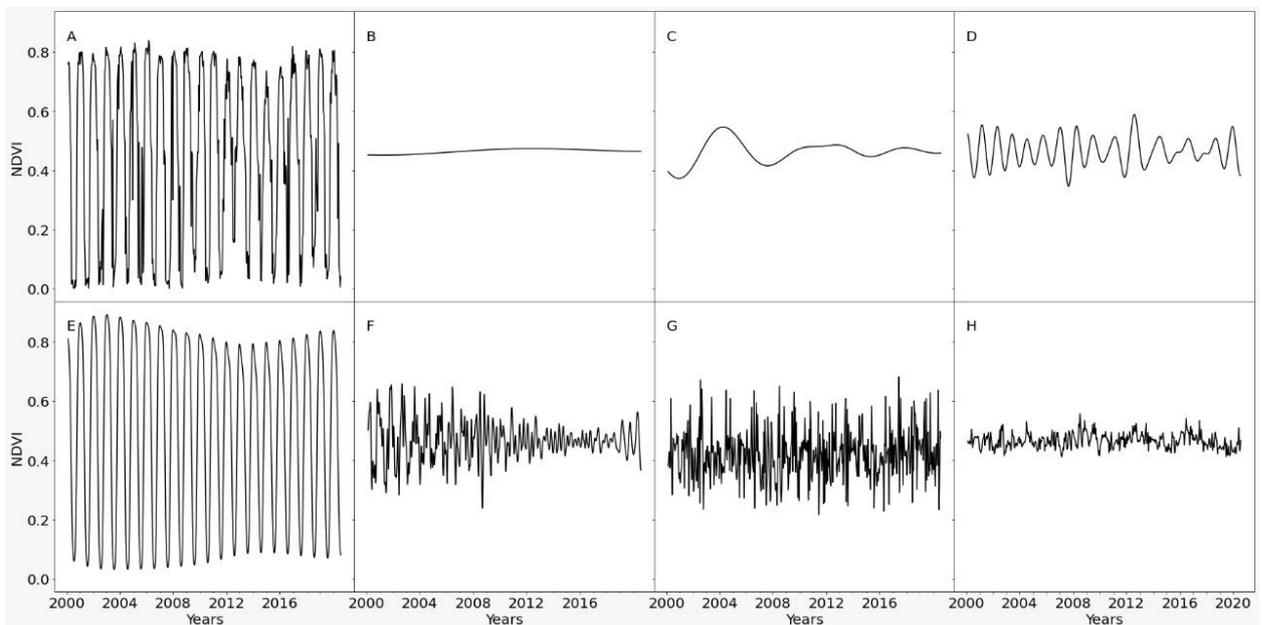


Figura 21. Dinámica temporal del NDVI del arquetipo 4.a (A, serie original), descompuesta en distintos componentes de frecuencia: B) Tendencia, C) Frecuencias bajas ( $> 4$  años), D) Frecuencias medias ( $> 1$  año y  $< 4$  años), E) Ciclo anual, F) Frecuencias altas ( $< 1$  año), G) Ruido no correlacionado, H) Ruido auto-correlacionado.

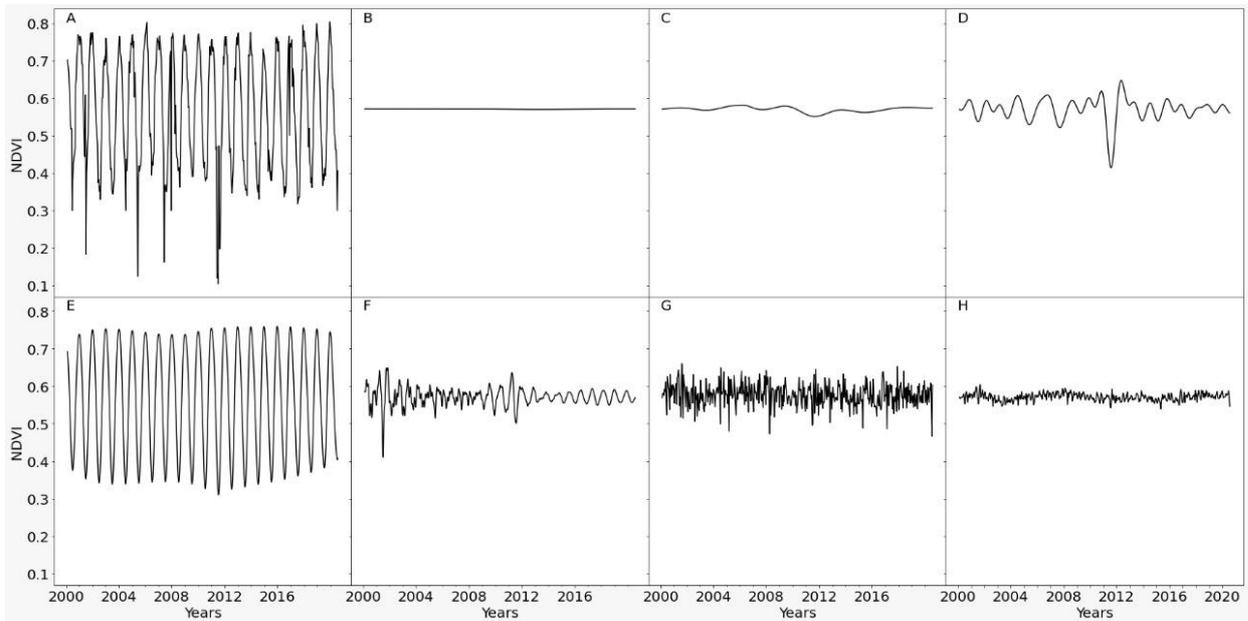


Figura 22. Dinámica temporal del NDVI del arquetipo 4.b (A, serie original), descompuesta en distintos componentes de frecuencia: B) Tendencia, C) Frecuencias bajas ( $> 4$  años), D) Frecuencias medias ( $> 1$  año y  $< 4$  años), E) Ciclo anual, F) Frecuencias altas ( $< 1$  año), G) Ruido no correlacionado, H) Ruido auto-correlacionado.

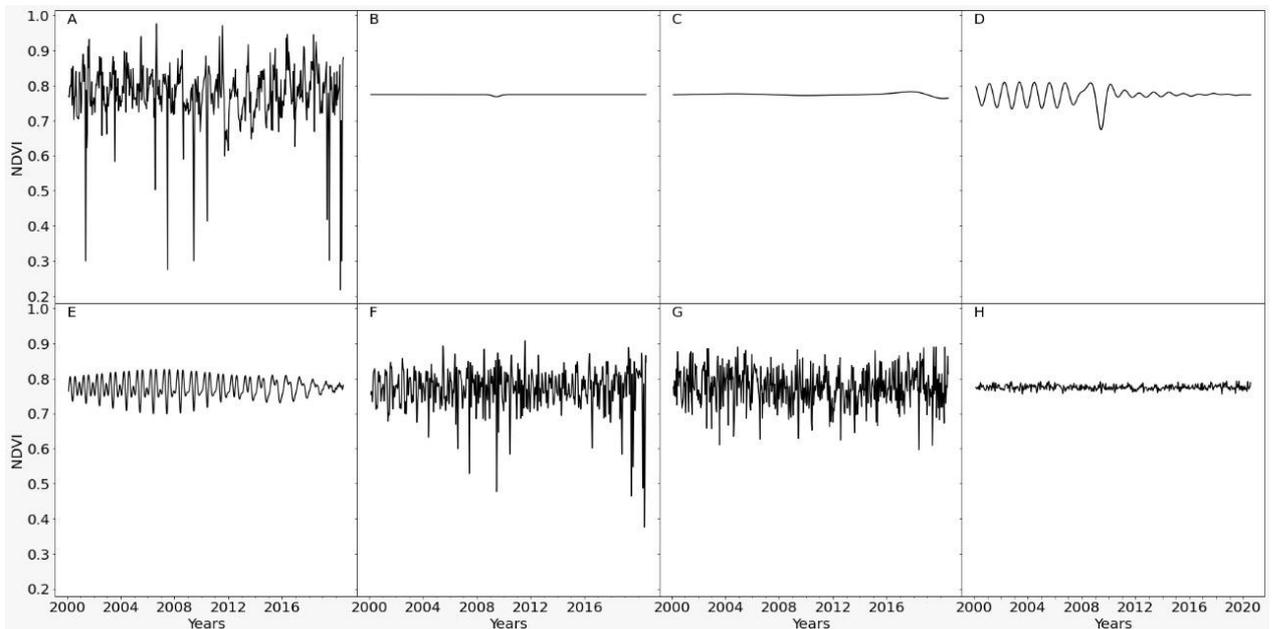


Figura 23. Dinámica temporal del NDVI del arquetipo 5 (A, serie original), descompuesta en distintos componentes de frecuencia: B) Tendencia, C) Frecuencias bajas ( $> 4$  años), D) Frecuencias medias ( $> 1$  año y  $< 4$  años), E) Ciclo anual, F) Frecuencias altas ( $< 1$  año), G) Ruido no correlacionado, H) Ruido auto-correlacionado.

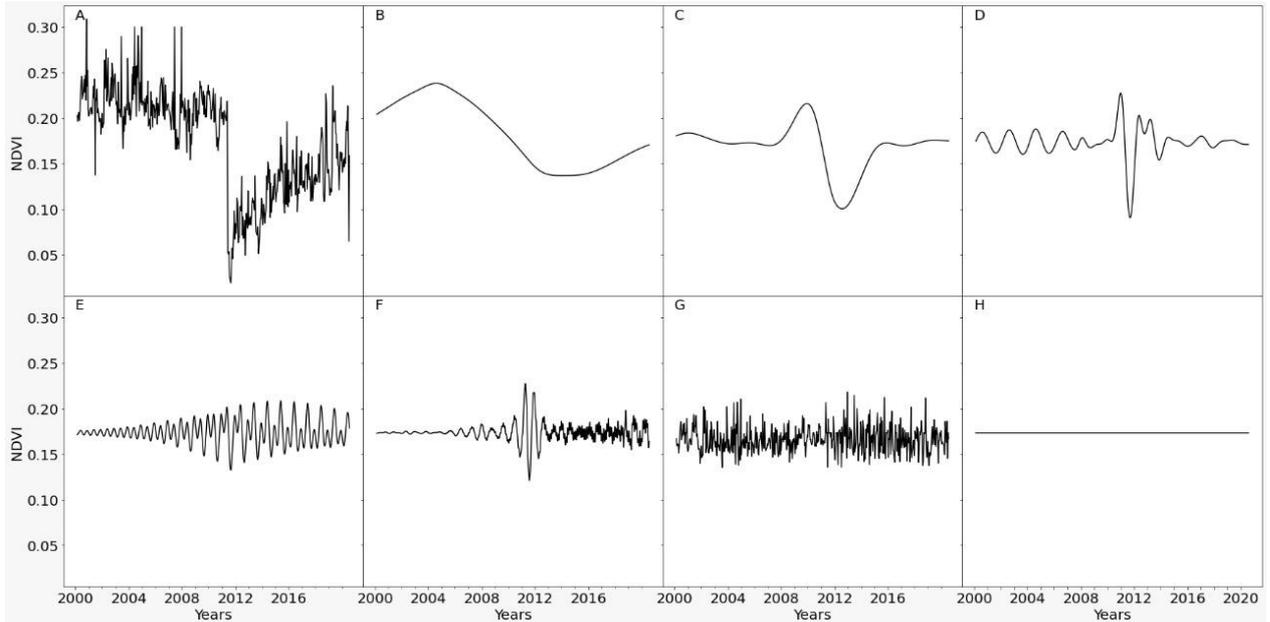


Figura 24. Dinámica temporal del NDVI del arquetipo 6 (A, serie original), descompuesta en distintos componentes de frecuencia: B) Tendencia, C) Frecuencias bajas (> 4 años), D) Frecuencias medias (> 1 año y < 4 años), E) Ciclo anual, F) Frecuencias altas (< 1 año), G) Ruido no correlacionado, H) Ruido auto-correlacionado.

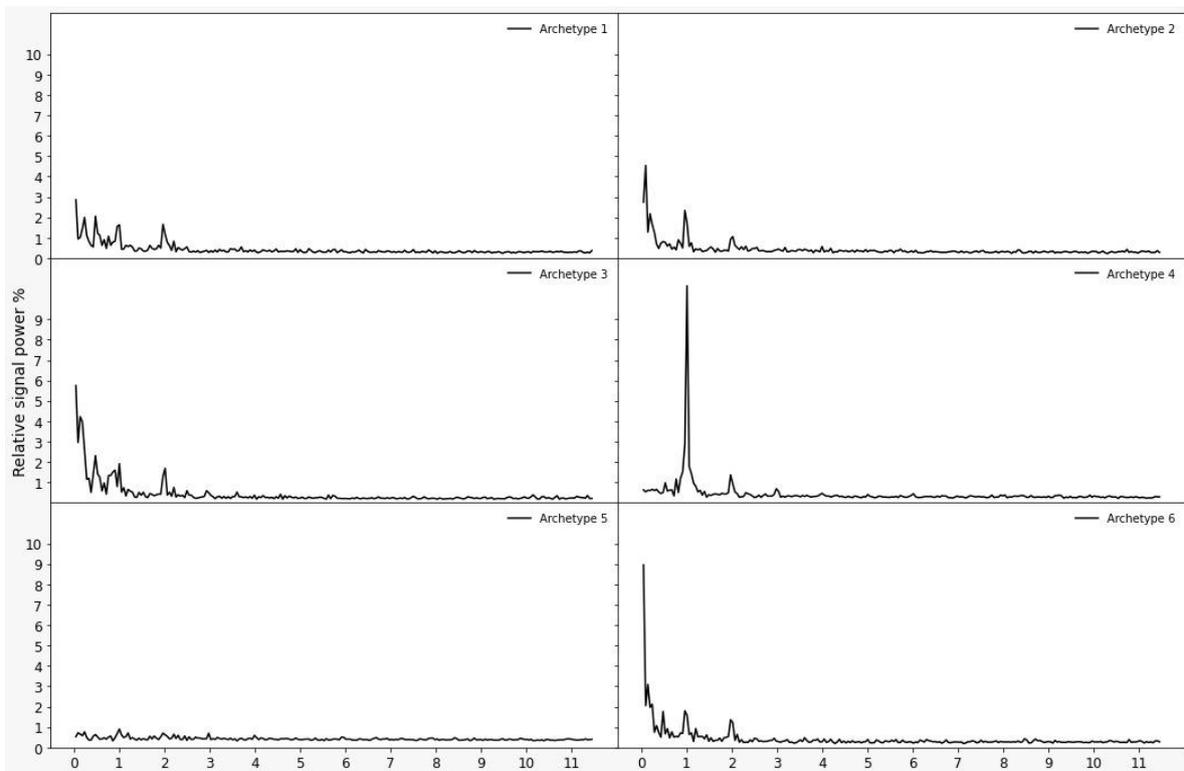


Figura 25. Espectro de potencia de los píxeles más representativos de cada arquetipo.



Ubicación de los arquetipos o píxeles más representativos por arquetipo:

Arquetipo 1) Longitud -41.166666666666664 latitud -71.00455093442561  
Arquetipo 2) Longitud -40.554166666666667 latitud -70.81711184704152  
Arquetipo 3) Longitud -40.597916666666667 latitud -70.77014706333242  
Arquetipo 4a) Longitud -40.622916666666667 latitud -71.20011413195053  
Arquetipo 4b) Longitud -41.022916666666667 latitud -71.20280391524328  
Arquetipo 5) Longitud -40.952083333333334 latitud -71.4766804301531  
Arquetipo 6) Longitud -40.947916666666664 latitud -71.02257279652515



## ANEXO II

### Metodología

La información fue analizada para toda el área de estudio y se presenta en mapas e indicadores de series temporales que sirven para caracterizar la dinámica temporal de la productividad de la vegetación y analizar escenarios futuros de su evolución.

#### *Fuente de datos*

Se utilizaron datos de imágenes MODIS (producto MODIS13Q1) para el período temporal febrero 2000 - noviembre 2020 (frecuencia de datos cada 16 días y píxel de resolución espacial de 6,25ha). Se calculó el NDVI mediante la siguiente ecuación (Ec.1):

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R})$$

donde NIR y R son la reflectancia superficial de la tierra centrada en las porciones 858 nm (infrarrojo cercano) y 648 nm (visible) del espectro electromagnético, respectivamente. El pre-procesamiento de información se realizó siguiendo el procedimiento efectuado por Easdale et al. (2018).

#### *Filtrado de las series*

Con las series de NDVI, se procedió a realizar un filtrado de paso bajo por medio de wavelets. La serie de valores de cada píxel fue descompuesta en una serie de átomos de gabor (funciones sinusoidales localizadas en el tiempo por medio de una ventana gaussiana), por medio del algoritmo *Basis Pursuit* (Chen, 2001). La secuencia de átomos así obtenidos fue filtrada, por medio de la eliminación de los átomos cuya frecuencia fuese mayor a 1/4 años, y luego se reconstruyó la serie con los átomos remanentes, de manera que sólo quedase variabilidad de mediano-largo plazo. Dicha información representa la tendencia y el ciclo de tendencia (tendencia más ciclos de más de 4 años). El filtrado y reconstrucción de la serie fue realizada por medio del software *gpu\_pursuit* versión 0.02 (Bruzzone y Easdale, 2018).

#### *Clasificación de la Tendencia Cíclica de NDVI*

Se definieron siete clases de Tendencia Cíclica, estadísticamente significativas, en función de la posición de los máximos y/o mínimos locales de la serie filtrada (Fig. A-1). Las secuencias temporales de las tendencias cíclicas conforman dos fases. Una positiva asociada a valores recientes cercanos a máximos, conformada por la Recuperación Avanzada y Recaída Inicial; otra negativa asociada a valores recientes cercanos a mínimos, conformada por Recaída avanzada y Recuperación inicial (Fig. A-2; Easdale et al. 2019). Los resultados de la Tendencia Cíclica para el área de trabajo se presentan en la Figura 1.

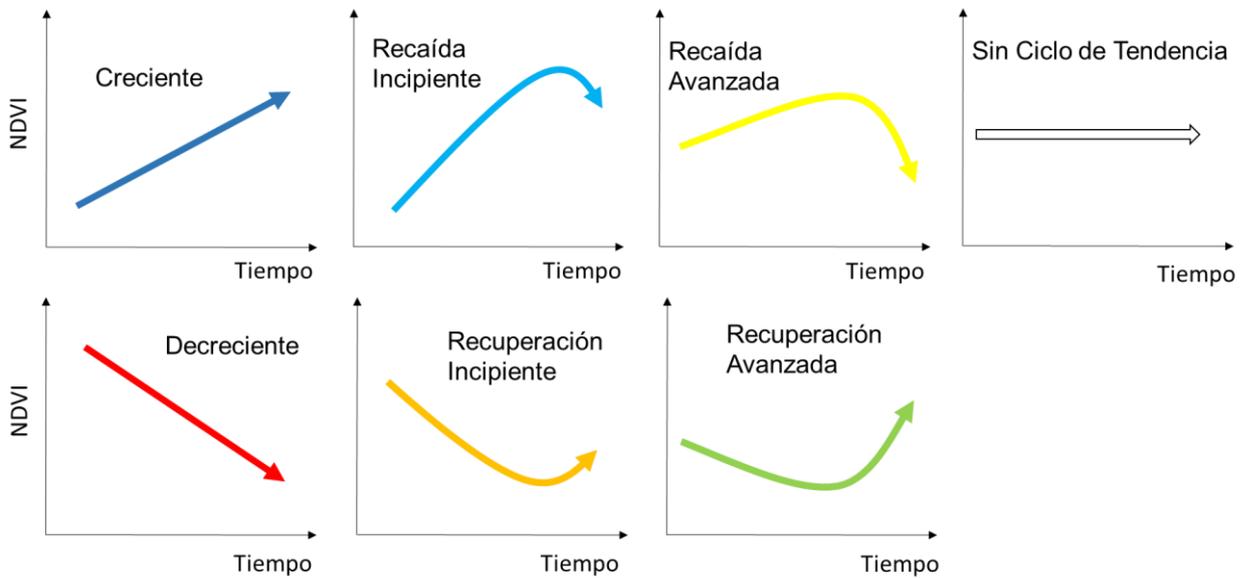


Figura A-1. Clases de Tendencias Cíclicas de NDVI. El color de la flecha identifica el color usado para cada clase en el mapa correspondiente (Fig. 1).

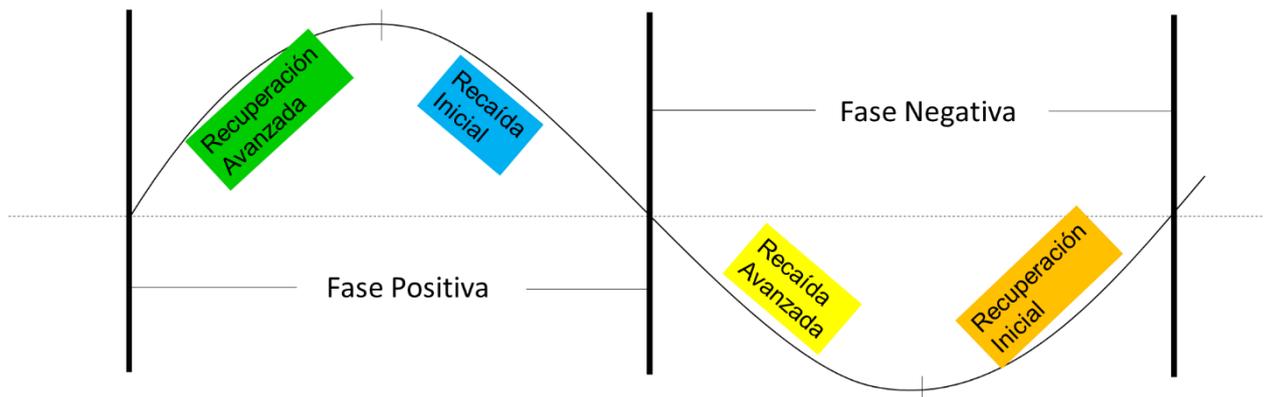


Figura A-2. Fases de Tendencias cíclicas: Positiva, conformada por Recuperación Avanzada y Recaída Inicial; Negativa, conformada por Recaída avanzada y Recuperación inicial.

### Ritmo de cambio de la Tendencia Cíclica

El ritmo de cambio es un indicador generado a partir de la combinación de la derivada primera y segunda del punto final de la función que describe la Tendencia Cíclica. La derivada primera refleja la dirección que toma la función (positiva, neutra o negativa), mientras que la derivada segunda refleja la velocidad del cambio (positiva, neutra o negativa). Combinando ambas fuentes de información, se construyeron nueve clases: A) Valores por encima del promedio histórico: 1. Crecimiento acelerado (sentido positivo y con tasa positiva, violeta), 2. Crecimiento lento (sentido positivo y con tasa negativa, azul), 3. Declive lento (sentido negativo y con tasa positiva, turquesa), 4. Declive acelerado (sentido negativo y con tasa negativa, amarillo); B) Valores por debajo del promedio histórico: 5. Crecimiento acelerado (sentido positivo y con tasa positiva, verde), 6. Crecimiento lento (sentido positivo y con tasa negativa, marrón claro), 7. Declive lento (sentido negativo y con tasa positiva, rojo), 8. Declive acelerado (sentido negativo

y con tasa negativa, magenta); y 9. Sin cambios (sentido neutro y tasa de cambio neutro, gris) (Fig. A-3).

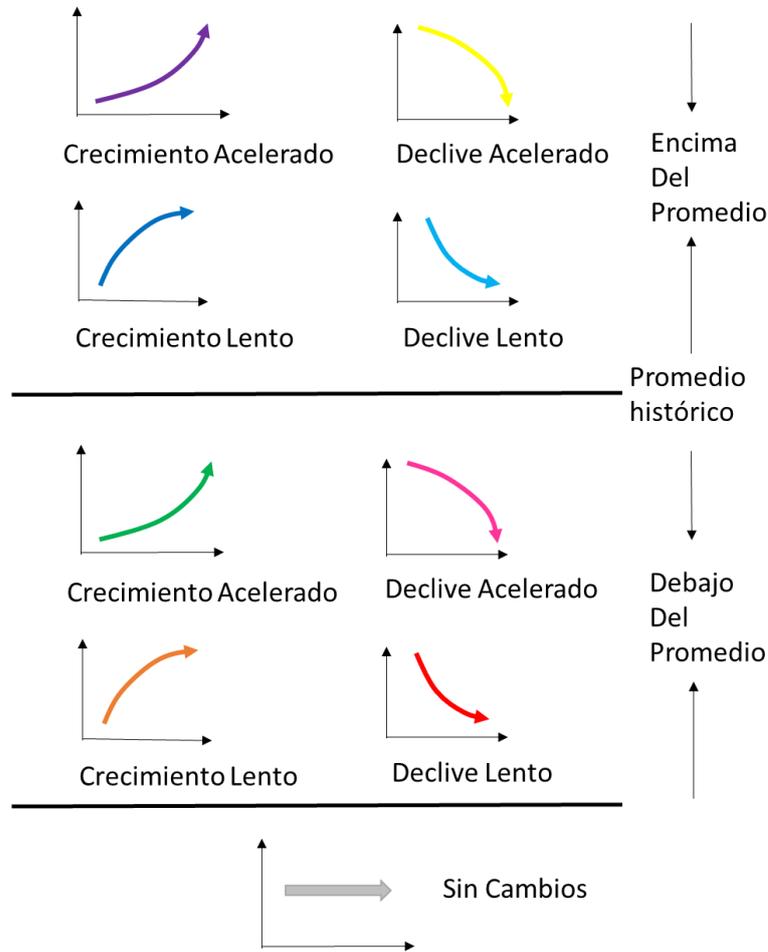


Figura A-3. Clases de Ritmo de Cambio de la Tendencia Cíclica, utilizada en el mapa de la figura correspondiente (Fig. 2).

### *Análisis de arquetipos de la dinámica temporal de la productividad de la vegetación*

Se realizó un análisis de arquetipos, aplicado a las series temporales de NDVI de cada píxel ubicado en el área de estudio (Bruzzone y Easdale, *en prensa*). El análisis de arquetipos permite analizar patrones diferenciales de comportamiento de una multiplicidad de variables, pudiendo trabajar eficientemente con grandes bases de datos. Para ello, se utilizaron los parámetros obtenidos con la Transformada Rápida de Fourier (TRF) aplicada a cada serie de tiempo, utilizando cada píxel como una observación. La TRF permite identificar de manera sencilla las frecuencias contenidas en las series como, por ejemplo, el ciclo anual, ciclos inter-anales y ciclos intra-anales (ver espectro de potencia en Fig. 25). Luego se selecciona la cantidad de arquetipos que mejor representa la muestra analizada (en este caso, se identificaron seis arquetipos). Posteriormente, para cada arquetipo se identificaron píxeles candidatos (arquetipoides o píxeles más representativos), que mejor representan el patrón encontrado en cada uno, respectivamente. Dichos arquetipoides fueron identificados espacialmente, para los cuales se estimaron medias móviles para evaluar el comportamiento de la dinámica a corto, mediano y largo plazo.



### *Medias Móviles de la dinámica funcional de la vegetación*

La media móvil nos muestra el valor promedio del NDVI, considerando una ventana de tiempo determinada. La ventana de tiempo se mueve con cada valor nuevo en la serie, para registrar los cambios en el promedio durante ese lapso de tiempo. Es una técnica elemental de predicción. Cuanto más grande sea la ventana de tiempo de observación, mayor será la influencia de los datos antiguos. En contrapartida, si se selecciona una ventana de tiempo corta, se tendrán en cuenta datos más recientes para la predicción. Permite suavizar los cambios de corto plazo y resaltar las tendencias y cambios a mediano y largo plazo.

#### *Media móvil anual (MMA)*

La media móvil anual muestra el promedio del NDVI considerando un lapso de tiempo igual a un año. Dado que se cuenta con un dato cada 16 días, tenemos en el año un total de 23 datos de NDVI. En consecuencia, la ventana de tiempo para calcular la media móvil de cada nuevo dato que ingresa, considera los últimos 23 datos.

#### *Media móvil diferencial de mediano plazo (Diferencia entre MManual y MM4 años)*

La curva muestra la evolución de la diferencia entre la media móvil anual (calculada con una ventana de tiempo de 23 datos) y la media móvil de cuatro años (calculada con una ventana de tiempo de 92 datos). Permite comparar una situación corriente respecto de los cuatro años previos, considerados como una fase de mediano plazo en la actividad de la vegetación.

El valor cero es utilizado como umbral de referencia, dado que indica que la media móvil anual se ubica al mismo nivel que la media móvil de los cuatro años precedentes. Por ende, los valores positivos indican que la situación, para esos momentos, fueron o son mejores que los registrados en los cuatro años previos. A la inversa, valores negativos indican que la situación, para esos momentos, fueron o son peores que los registrados en los cuatro años previos.

#### *Media móvil diferencial de largo plazo (Diferencia entre MM4 años y MM8 años)*

La curva muestra la evolución de la diferencia entre la media móvil de cuatro años (calculada con una ventana de tiempo de 92 datos) y la media móvil de ocho años (calculada con una ventana de tiempo de 184 datos). Permite comparar la situación de mediano plazo respecto de ocho años previos, considerada una fase de largo plazo en la actividad de la vegetación, permitiendo identificar en qué fase de largo plazo se encuentran los valores corrientes (similar a la Fig. 2).

El valor cero es utilizado como umbral de referencia, dado que indica que la media móvil de cuatro años se ubica al mismo nivel que la media móvil de los ocho años precedentes. En consecuencia, los valores positivos indican que la situación de mediano plazo (ventana de cuatro años), y para esos momentos, fueron o son mejores que los registrados en los ocho años previos. A la inversa, valores negativos indican que la situación de mediano plazo (ventana de cuatro años), para esos momentos, fueron o son peores que los registrados en los cuatro años previos.

### *Componentes de frecuencia de la dinámica temporal de la productividad de la vegetación*

El modelo auto-regresivo de wavelet, como método aplicado al estudio de la dinámica de NDVI permite capturar cambios cíclicos de distinta longitud de onda (Easdale et al. 2018), ofreciendo un elemento diagnóstico de la dinámica de la productividad de la vegetación en las últimas dos décadas. Dicho análisis se realizó para las series de NDVI de los píxeles más representativos de



los arquetipos, e incluyo las siguientes frecuencias: i) la Tendencia (movimiento a largo plazo) (Easdale et al., 2018), ii) Frecuencias bajas (fluctuaciones de mediano plazo, mayores a cuatro años; Easdale et al., 2019), iii) Frecuencias medias (fluctuaciones mayores a un año y menores a cuatro años) iv) Ciclo Anual (cambios estacionales, que ocurren entre invierno y verano), v) Frecuencias altas (oscilaciones o pulsos intra-anales), vi) Ruido no correlacionado (ruido o error contenido en la serie originados en el sensor, interferencias de la atmósfera), vii) Ruido auto-correlacionado (ruido o error positiva o negativamente correlacionado, aspecto que podría estar vinculado a la influencia de factores ambientales).

#### *Análisis de correlación entre clima y series de NDVI*

Utilizamos los conjuntos de datos ERA5, producidos por el Servicio de Cambio Climático de Copernicus, el Centro Europeo para el Pronóstico del Tiempo a Medio Plazo (Hersbach et al., 2020). Este conjunto de datos es un nuevo análisis de datos globales de la atmósfera desde 1979 hasta la actualidad, con una resolución espacial de 0,1 grados y una frecuencia de una hora. Para los propósitos de este informe, utilizamos datos para el período 1980-2019, y re-muestreamos su frecuencia a una vez por día. De las variables disponibles, utilizamos las principales variables climáticas: temperatura y precipitación total estimada, manteniendo el modelo lo más simple posible. Para explicar los datos observados del NDVI en función del clima, propusimos un modelo lineal-multiplicativo con un proceso Gaussiano, para controlar la auto-correlación en la serie de tiempo del NDVI (detalles en Bruzzone y Easdale, *en prensa*).

#### **Bibliografía**

- Bruzzone O, Easdale MH. (2018). Gpu\_pursuit, version 0.2, Zenodo. DOI: 10.5281/zenodo.1283338.
- Bruzzone O, Easdale MH. (*en prensa*). Archetypal temporal dynamics of arid and semi-arid rangelands. *Remote Sensing of Environment*.
- Chen SS, Donoho DL, Saunders MA. (2001). Atomic decomposition by basis pursuit. *SIAM review*, 43(1), 129-159.
- Easdale, M.H., Bruzzone, O., Mapfumo, P., Tittonell, P. (2018). Phases or regimes? Revisiting NDVI trends as proxies for land degradation. *Land Degradation & Development* 29, 433-445. DOI:10.1002/ldr.2871.
- Easdale MH, Fariña C, Hara S, Pérez León N, Umaña F, Tittonell P, Bruzzone O. (2019). Trend-cycles of vegetation dynamics as a tool for land degradation assessment and monitoring. *Ecological Indicators* 107, 105545. DOI:10.1016/j.ecolind.2019.105545.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.