

Caracterización funcional de las vegas del noroeste de San Juan: efecto de la sequía y la instalación de la mina de Veladero

Trabajo final presentado para optar al título de Especialista en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica

Leticia Sabrina Castro Sardiña
Licenciada en Biología-Universidad Nacional de San Juan-2016

Lugar de trabajo: Instituto de Investigaciones Fisiológicas y Ecológicas vinculadas a la Agricultura



FAUBA



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía - Universidad de Buenos Aires

TUTOR/ES

Tutor

Jorge Gonzalo Nicolás Irisarri

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)
Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

JURADO DE TRABAJO FINAL

Jurado

Gabriela Posse Beaulieu

Licenciada en Ciencias Biológicas (Universidad de Buenos Aires)
Doctora en Ecología (Universidad de Buenos Aires)

Jurado

Pablo Baldassini

Licenciado en Ciencias Ambientales (Universidad de Buenos Aires)
Doctor en Ciencias Agrarias (Universidad de Buenos Aires)

Fecha de defensa del Trabajo Final: 15 de octubre de 2019

Dedicatoria

A mi abuela Negra y mi abuelo Luis.

Agradecimientos

A mis padres, quienes me brindaron su apoyo desde un comienzo, incentivando mis deseos de buscar nuevos horizontes donde seguir formándome. Porque siempre me impulsan a más, porque siempre creen en mí, GRACIAS.

A Gonzalo, mi tutor, por confiar en mí para este proyecto y los que vendrán. Le agradezco por guiarme en el desarrollo de este trabajo y por enseñarme que “la honestidad intelectual es el único capital de un científico”.

Al jurado, Gabriela Posse y Pablo Baldassini, por dedicarle su tiempo a las revisiones y sugerencias de este trabajo las cuales permitieron mejoras significativas en el manuscrito final.

A mis compañeras de estudio, Marti, Eli, Clari, Lau y Jaquie; porque además de ser un apoyo durante la cursada significaron mis primeras amistades en esta increíble ciudad.

Al LART, por el espacio y las herramientas brindadas para poder desarrollar este trabajo y a todos los que en él trabajan.

A Germán, quien a pesar de las distancias de saberes siempre supo escucharme y calmar mis ansiedades.

A Marcela Ontivero, por compartirme sus saberes y experiencia sobre la zona de estudio, por preguntarme siempre y estar atenta a todo mi proceso de trabajo.

“Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original, producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no ha sido presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.”

Titulo

Caracterización funcional de las vegas del noroeste de San Juan: efecto de la sequía y la instalación de la mina de Veladero

Resumen

Los ambientes de vegas son relevantes por la provisión de bienes y servicios ecosistémicos, en particular en zonas áridas. En las últimas décadas se han acentuado procesos climáticos extremos (sequías) y actividades humanas (minería) que podrían haber afectado dicha provisión. El objetivo de este trabajo fue estudiar cómo varió el funcionamiento de las vegas en el noroeste de San Juan desde 1999 a 2017 considerando la instalación de la mina Veladero (2005). La caracterización del funcionamiento de estos ecosistemas se realizó través del Índice de Vegetación Normalizado (IVN) utilizando datos mensuales del producto “Landsat 7 32-day NDVI Composite”. Se identificaron las vegas mediante una clasificación no supervisada a partir de valores de IVN. Las vegas clasificadas fueron agrupadas según la cuenca a la que pertenecían. Se cuantificó la tendencia interanual del IVN promedio (período octubre del año 1 a marzo del año 2) y de la heterogeneidad de éste, a través del coeficiente de variación, para cada una de las vegas (n=1258). Se observó que en el 47% de las vegas hubo una tendencia en el IVN a través del tiempo, siendo el 86% negativas. La heterogeneidad del IVN, presentó una tendencia en el tiempo en el 39,5% de las vegas analizadas, siendo el 65,3 % negativas. El 46% de las vegas con tendencias significativa para el IVN mostró tendencias significativas en la heterogeneidad espacial. Las vegas insertas en la misma cuenca que el proyecto minero de Veladero no presentaron un patrón de cambio en el IVN extremadamente diferente al observado en vegas de otras cuencas. Los resultados obtenidos a partir de este trabajo pueden representar una herramienta de soporte para la toma de decisiones con relación a mitigar el impacto que puede tener el Cambio Climático y las actividades humanas.

Title

Functional characterization of meadows from northwestern San Juan province:
effects of drought and the Veladero mine

Abstract

Meadows inserted in arid environments are key for the provision of ecosystem goods and services. In the last decades, extreme climatic events, droughts, became more frequent and intense. At the same time, human activities, as mining, expanded to new areas potentially affecting the provision of services by meadows. The objective of this thesis was to describe, through a spectral index, carbon uptake changes between 1999 and 2017. Carbon uptake was associated with the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), closely associated with the proportion of photosynthetic incoming radiation absorbed by growing vegetation. To do so, first, I identified meadow areas through an unsupervised classification based on NDVI values (Landsat 5 images from years 1984, 1986 and 1987). Second, each meadow was grouped according to the basin to which it belonged. Third, I quantified, for each meadow area, two trends, its NDVI and its heterogeneity, through the coefficient variation (CV). 1258 meadow areas were identified representing 1900 ha. In 47% of the meadows there was significant temporal trend of NDVI, and were majorly negative, 86%. In 39.5% of the meadows there was a significant trend of the spatial CV. It was negative in 65.3% of the meadows. Meadows inserted in the same basin as the Veladero mining did not show a pattern of change extremely different from meadows in other basins. These results are a support tool for decision making in relation to mitigating the impact that Climate Change and human activities.

Índice

Introducción.....	10
Materiales y métodos.....	13
<i>Descripción del área de estudio.....</i>	13
<i>Metodología.....</i>	14
<i>Objetivo específico a: Identificación de vegas.....</i>	14
<i>Objetivo específico b: Caracterización del funcionamiento.....</i>	15
<i>Análisis estadísticos.....</i>	15
Resultados.....	20
<i>Objetivo específico a: Identificación de las vegas.....</i>	20
<i>Valor medio de IVN.....</i>	21
<i>Objetivo específico b: Caracterización del funcionamiento.....</i>	22
<i>Tendencia temporal del promedio de IVN.....</i>	22
<i>Modelo lineal vs. Modelo segmentado.....</i>	23
<i>Valor medio de CV.....</i>	25
<i>Tendencia temporal de la heterogeneidad.....</i>	26
<i>Distancia a la Mina Veladero.....</i>	28
<i>Síndromes de cambio en las áreas de vega.....</i>	29
Discusión.....	32
Conclusiones.....	35
Bibliografía.....	36

Índice de figuras

Figura 1 Vega atravesada por la huella del camino minero. Fuente: Google Street Map.	11
Figura 2 En la esquina superior izquierda la Provincia de San Juan inserta en Argentina. Limitado en rojo el área de estudio. Mapa principal en detalle del área de estudio.	13
Figura 3 Esquema del análisis de regresión lineal de los valores promedio de IVN para cada vega para cada estación de crecimiento en función del tiempo (expresado en años).	16
Figura 4 Secuencia de pasos realizados para obtener el IVN promedio y CV espacial para cada vega por estación de crecimiento. En negrita y subrayado las variables empleadas en los análisis.	16
Figura 5 Esquema del análisis de regresión lineal de los valores promedio de CV espacial para cada vega para cada estación de crecimiento en función del tiempo (expresado en años).	17
Figura 6 Cuadrantes sintéticos e indicadores del fruncimiento de las vegas estudiadas. Cuadrante I: representa un aumento de la heterogeneidad y de la productividad. Cuadrante II: representa un aumento de la productividad con homogeneización. Cuadrante IV: representa una disminución de la productividad con aumento de la heterogeneidad (heterogeneización), indicadora de una primera fase de degradación. Cuadrante III: representa una disminución de la productividad con disminución de la heterogeneidad, indicadora de una segunda fase de degradación. (Adaptado de Paruelo y Aguiar 2003).	18
Figura 7 Panel de la izquierda: Clasificación no supervisada de una parte del área de estudio a modo de ejemplo. Panel de la derecha: Imagen de alta resolución de la misma porción. Delimitados con líneas negras las áreas clasificadas como vegas.	20
Figura 8 Valores promedio de IVN para cada cuenca en el total del periodo estudiado (n=22640, 1258 vegas x 18 años). Las líneas verticales representan el desvío estándar.	21
Figura 9 Número de vegas por cuenca diferenciando aquellas que presentaron una tendencia significativa de IVN en el tiempo de aquellas que no.	22
Figura 10 Estimadores de pendiente de $IVN=f(t)$ por cuenca. Cada barra representa el valor promedio de las pendientes significativas estimadas de la regresión lineal entre IVN y tiempo por cuenca. Letras distintas indican diferencias significativas entre los valores (prueba de Kruskal Wallis; $H=44,91$; $p=<0,0001$). Las líneas verticales representan el desvío estándar.	23
Figura 11 Esquema de los tipos de patrón de cambio de IVN según los dos modelos segmentados más frecuentes para la cuenca Aguas arriba. La línea llena indica que el estimador de la pendiente fue estadísticamente significativo y la línea discontinua lo contrario. En cada panel se indican las proporciones de vegas según el momento en que se da el quiebre en el modelo segmentado (parámetro gamma).	24
Figura 12 Esquema de los tipos de patrón de cambio de IVN según los tres modelos segmentados más frecuentes para la cuenca Aguas abajo. La línea llena indica que el estimador de la pendiente fue estadísticamente significativo y la línea discontinua lo contrario. En cada panel se indican las proporciones de vegas según el momento en que se da el quiebre en el modelo segmentado (parámetro gamma).	25
Figura 13 Coeficiente de variación espacial por cuenca. Valores promedio del CV espacial de las vegas insertas en cada cuenca en el total del periodo estudiado (n=18918, 1051 vegas x 18 años). Las líneas verticales representan el desvío estándar.	26
Figura 14 Número de vegas por cuenca diferenciando aquellas que presentaron una tendencia significativa del CV espacial en el tiempo de aquellas que no.	27
Figura 15 Estimadores de pendiente de $CV=f(t)$ por cuenca. Cada barra representa el valor promedio de las pendientes significativas estimadas de la regresión lineal entre CV y tiempo para cada cuenca. Letras distintas indican diferencias significativas entre los valores (prueba de Kruskal Wallis; $H=34,19$; $p=<0,0001$). Las líneas verticales representan el desvío estándar.	28
Figura 16 Asociación entre los estimadores de cambio en el IVN a través del tiempo (pendiente de la regresión lineal entre IVN y tiempo en años) y la distancia al campamento principal de la Mina de Veladero (n=134; $p=0,0098$; $R^2=0,04225$). En colores distintos se diferencian los tipos de modelo que mejor explicaron las tendencias en el tiempo del IVN.	29
Figura 17. Cuadrantes representativos de los síndromes de cambio de las áreas de vega. Cada círculo representa una vega para la cual se estimó la tendencia de cambio en el IVN y en su CV espacial (n=1258). En verde las vegas con ambos estimadores no significativo. En rojo se indican las vegas que presentaron tendencias significativas en ambos estimadores, en celeste sólo para el CV espacial	

y en lila aquellas que presentaron tendencias significativas sólo para el IVN. El tamaño del punto es proporcional al valor de índice de caracterización de vega (ICV). A la derecha la distribución de ICV por cuadrante sólo considerando los datos significativos. Letras distintas indican diferencias significativas (prueba de Kruskal Wallis; $H= 53,99$; $p= <0,0001$). 30

Figura 18 Cuadrantes representativos de los síndromes de cambio de las áreas de vega por cuenca para las vegas con tendencias distintas de 0 (valor $p <0,05$). Cada círculo representa una vega para la cual se estimó la tendencia de cambio en el IVN y en su CV espacial. En rojo se indican las vegas que presentaron tendencias significativas en ambos estimadores, en verde sólo para el CV espacial y en celeste aquellas que presentaron tendencias significativas sólo para el IVN. El tamaño del punto es proporcional al valor de índice de conservación de vegas (ICV). N = al número de datos correspondiente para cada cuadrante. 31

Introducción

Las vegas son un tipo específico de humedales (Izquierdo et al., 2018). Estos ecosistemas, formados por escurrimiento superficiales temporales con vegetación herbáceas e hidrofítica (Secretaría de Convención de Ramsar, 2008; Ontivero y Martínez Carretero, 2013) se distribuyen desde los Andes del centro norte de Argentina abarcando la región Puneña y Altoandina (Ontivero y Martínez Carretero, 2013; Izquierdo et al., 2018) y a lo largo de toda la provincia fitogeográfica de Patagonia (Soriano, 1956; León et al., 1998). Las vegas son importantes en el entorno desértico o semidesértico en el que se encuentran. Esto se debe a que a pesar de ser áreas pequeñas poseen una alta productividad y biodiversidad (Boelcke, 1957; Paruelo et al., 2004; Collantes et al., 2009; Secretaría de Convención de Ramsar, 2010; Chimner et al., 2011; Gaitan et al., 2011; Izquierdo et al., 2018).

Estos sistemas ofrecen una amplia variedad de servicios ambientales. En las cuencas hidrográficas, las vegas intervienen en los ciclos hidrológicos regulando los flujos hídricos superficiales y subterráneos provenientes del derretimiento de la nieve y deshielos glaciares (Secretaría de Convención de Ramsar, 2008; Ontivero y Martínez Carretero, 2013, Izquierdo et al., 2018). Además, estos ecosistemas, estabilizan los suelos, previenen derrumbes, disminuyen la erosión hídrica, fijan carbono, purifican la atmósfera y estabilizan el clima (Secretaría de Convención de Ramsar, 2008, Izquierdo et al., 2018). Sin embargo, en las últimas décadas, han experimentado una serie de procesos que podrían haber afectado su capacidad de proveer bienes y servicios. Por un lado, y asociado a causas naturales, se han intensificado procesos de sequías (Zhao y Running, 2009). Por otro, se incrementó la presión humana sobre estos ambientes a través de actividades como el turismo, el pastoreo directo y los cambios en uso del suelo, de ganadería a la agricultura y la minería (Secretaría de Convención de Ramsar, 2010; Ontivero y Martínez Carretero, 2013; Izquierdo et al., 2015; Izquierdo et al., 2018). Como consecuencia de estos factores se ha propuesto un modelo conceptual de estados y transiciones para las vegas de la Patagonia (Paruelo y Aguiar 2003). Estos estados se asocian a diferentes grados de productividad y heterogeneidad de esta. En términos generales, el modelo establece que a medida que aumenta el deterioro la productividad baja y la heterogeneidad de esta aumenta porque las vías de riego de las áreas de vega se convierten en vías de drenaje profundo (Paruelo y Aguiar 2003). Sin embargo, este

modelo conceptual nunca se ha puesto a prueba o cuantificado para áreas de vega, ya sea en la Patagonia o en otras zonas áridas.

En relación con la actividad minera, en el año 2005 se inició en la provincia de San Juan el proyecto denominado Veladero. A diferencia de proyectos anteriores, éste se destaca por la superficie que ocupa y por el uso intensivo de agua para el proceso de separación de minerales. A su vez, dicho proyecto demandó la construcción de un acceso vial denominado “camino minero”. Este camino tiene un recorrido de 155 km aproximadamente (Oller et al., 2008) y en muchas partes atraviesa áreas de vegas, antes no transitadas (Fig. 1). Dentro de los Andes Centrales numerosos informes técnicos registraron el impacto sobre los glaciares por parte de proyectos mineros de gran escala como Veladero (Brenning y Azócar, 2010; Aedo y Montecinos 2011; Bianchini, 2011; Greenpeace, 2011; Taillant, 2012, 2013). En relación con las áreas de vegas, la información es más escasa. Por ejemplo, existen algunas hipótesis sobre la potencial amenaza de la minería de litio agravada por el cambio climático sobre vegas de la Puna argentina (Izquierdo et al., 2015). Más específicamente, y asociado al proyecto Veladero existen informes solicitados por la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Provincia de San Juan, pero los resultados de estos no están disponibles.



Figura 1 Vega atravesada por la huella del camino minero. Fuente: Google Street Map.

Dada esta falta de información y el solapamiento de causas que pueden afectar la provisión de bienes y servicios por parte de las áreas de vegas resulta de interés estudiar cómo varió el funcionamiento de estas en el noroeste de San Juan. La productividad primaria neta aérea (PPNA) representa el principal flujo de entrada de energía a los ecosistemas disponible para los niveles tróficos superiores, consumidores y detritívoros

(Chapin et al., 2011). Por ende, su alteración repercute en los otros niveles tróficos, además es el principal flujo de entrada de C, clave en el ciclo de este elemento (Chapin et al., 2011). Dado que el funcionamiento ecosistémico refiere al intercambio de materia y energía entre la comunidad biótica y la atmósfera la PPNA resulta en un excelente indicador de ello (Paruelo, 2008).

La PPNA puede ser estimada a partir de información provista por sensores remotos. Según el modelo radiativo (Monteith, 1972) la PPNA es consecuencia del triple producto entre la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFAi), la fracción de ésta que es absorbida por la vegetación (fRFAA) y la eficiencia en el uso de la radiación (EUR). En ecosistemas con fuertes variaciones estacionales en la dinámica de la PPNA, como las vegas, la fRFAA es el principal determinante de la PPNA (Garbulsky et al., 2011). Esta variable puede ser estimada por sensores remotos, por ejemplo, a través del índice de vegetación normalizado (IVN) (Sellers et al., 1992; Paruelo, 2008; Oesterheld et al., 2014). Esto se debe a que el IVN combina la radiación reflejada por la vegetación en dos porciones del espectro estrechamente vinculada con la actividad fotosintética por un lado (la porción del rojo), y con la estructura del canopeo por otro (porción del infrarrojo cercano).

En este contexto el objetivo general de este trabajo fue estudiar cómo varió el funcionamiento de las vegas en el noroeste de San Juan en los últimos años considerando que existió un proceso de sequía generalizado y que en una parte del área de estudio se llevó adelante la instalación de la mina de Veladero.

Para alcanzar el objetivo general se propusieron dos objetivos específicos:

a) determinar la ubicación de las vegas que se hallan alrededor del campamento Veladero, tanto aguas arriba como abajo de dicho proyecto, como así también vegas ubicadas en otras cuencas;

b) describir la variación interanual del IVN, descriptor de la dinámica de la PPNA, en las vegas clasificadas en el objetivo anterior en el periodo comprendido entre los años 1999-2017.

Materiales y métodos

Descripción del área de estudio

El área de estudio abarca partes de la cuenca del río Jáchal, en el departamento Iglesia, San Juan, Argentina. Dicha cuenca está compuesta por 3 subcuencas: río Blanco Norte, río Blanco Sur y río La Palca. Esta última subcuenca se divide en 3 tributarios: río La Palca, río Valle del Cura y río Las Taguas (Fig. 2). Dentro de esta última área se encuentra el proyecto minero Veladero ($29^{\circ}22'25,57''S - 69^{\circ}57'15,81''O$) a 375 km de la ciudad de San Juan. El acceso al área del Proyecto se logra a través de la ruta 418 que llega hasta el poblado de Tudcum donde comienza el denominado “Camino Minero”. El área de estudio, además, incluye al Parque Nacional San Guillermo (Fig. 2).

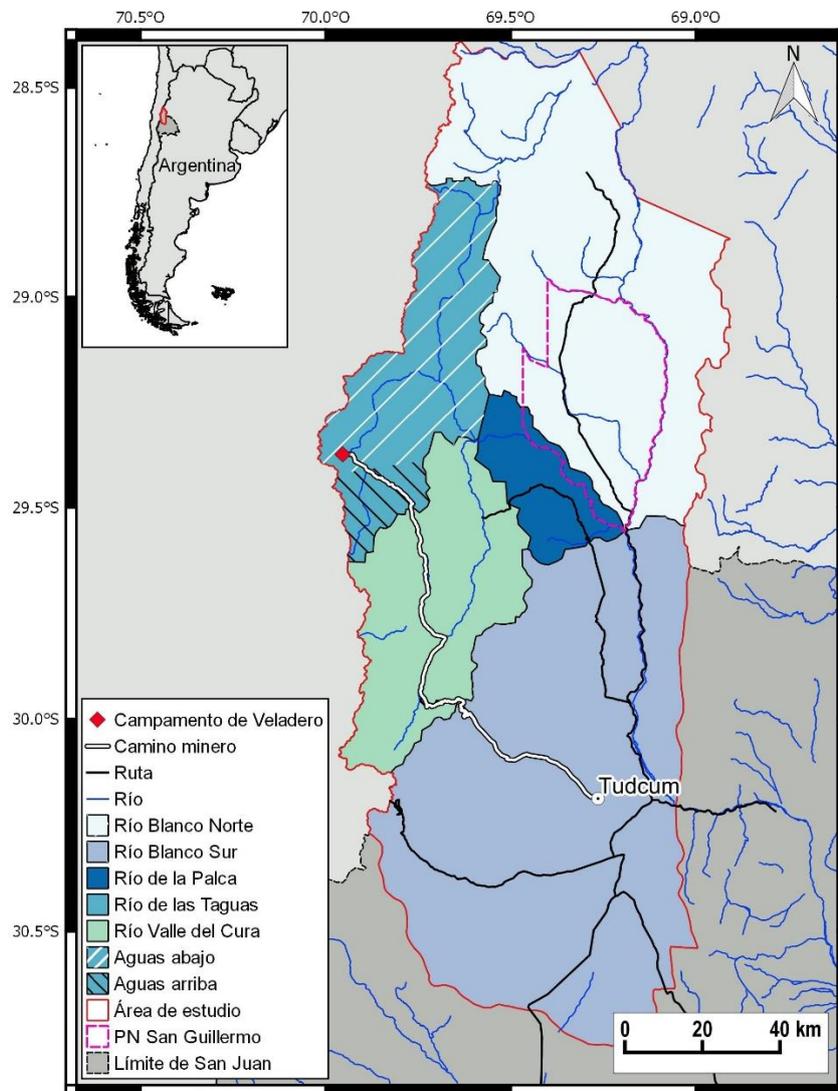


Figura 2 En la esquina superior izquierda la Provincia de San Juan inserta en Argentina. Limitado en rojo el área de estudio. Mapa principal en detalle del área de estudio.

El área de estudio se encuentra dentro del dominio Andino Patagónico abarcando las Provincias Fitogeográficas de la Puna (entre 3300 y 4400 m.s.n.m.) y la Altoandina (mayor a 4400 m.s.n.m.). Ambas regiones presentan un clima seco y frío con heladas todo el año y nevadas en invierno. La temperatura media es de 8° C en la provincia altoandina y oscila entre 7,5° C y 9,9° C en la puna. La vegetación dominante es la estepa arbustiva o la estepa herbácea, con formas extremas de adaptación al viento y a la sequía (Cabrera, 1971). En las vegas altoandinas predomina la especie *Andesinbi sexualis*, pequeña juncácea en cojin, acompañada por *Plantago barbata* y *Senecio breviscapus*, ambas hierbas perennes.

Metodología

La aproximación general consistió en evaluar la dinámica del índice de vegetación normalizado (IVN) desde 1999 a 2017 en áreas de vegas ubicadas en las distintas cuencas del área de estudio. Bajo el supuesto que la mina interviene en la dinámica hidrológica de la cuenca del río Las Taguas, donde se encuentra el proyecto, se dividió está en 2 áreas: aguas arriba y aguas abajo del emprendimiento minero (Fig. 2).

Objetivo específico a: Identificación de vegas

Para definir la ubicación de las vegas se realizó una clasificación no supervisada utilizando imágenes Landsat 5 con valores de IVN del mes de enero de los años 1984, 1986 y 1987 (Tamaño de píxel 900 m²) y se definieron 10 clases. Los años seleccionados permitieron establecer un área de referencia, para luego usar éstas en los análisis posteriores y fuera de este periodo.

Posteriormente, se vectorizó la primera clase, la de mayor valor de IVN, de la clasificación para lograr un conjunto de polígonos que representen los límites de las vegas presentes en la zona a mediados de la década de 1980. Esta aproximación asume que el tamaño máximo de las vegas se observó en este momento, y que luego las vegas pudieron mantener este tamaño o disminuir. Sin embargo, no se puede saber si las mismas aumentaron de tamaño.

La validación de la clasificación fue parcial y se realizó mediante una interpretación visual del área de estudio con una imagen satelital de mayor resolución que la utilizada para la clasificación y más reciente. Para ello, se observaron 300 vegas que abarcaron 400 ha de un total de 1258 vegas clasificadas abarcando un área de 1900 ha. Por último, se indicó la cuenca a la que pertenece cada vega: Blanco Norte, Blanco Sur, La Palca, Valle

del Cura, Las Taguas-aguas arriba y Las Taguas-aguas abajo (estas últimas, en adelante, denominadas Aguas arriba y Aguas abajo).

Además, para vegas presentes en la cuenca del río Las Taguas se midió la distancia desde el centroide de cada polígono hasta el campamento de la mina de Veladero.

Objetivo específico b: Caracterización del funcionamiento

Para describir la variación espacial y temporal interanual se utilizó el índice espectral IVN. En particular, se utilizó un producto sintético que brinda un dato cada 32 días para píxeles de 900 m² (Landsat 7 32-day NDVI Composite). Esta información se obtuvo a través de la plataforma Google Earth Engine, a través de esta se genera un mosaico con los datos de IVN para cada mes del año. El periodo analizado abarcó desde 1999 hasta 2017. Se definió cada estación de crecimiento como el periodo comprendido entre octubre del año 1 y marzo del año 2.

Análisis estadísticos

A partir de las series temporales de IVN que se generaron se realizaron dos tipos de análisis para poner a prueba el modelo conceptual propuesto por Paruelo y Aguiar (2003). En primer lugar, se estimó la tendencia temporal del promedio de IVN (octubre-marzo) por vega y cuenca. Para ello, se realizaron dos tipos de análisis de regresión, lineal simple y segmentada o por tramos (estas últimas sólo para las vegas Aguas arriba y abajo de la mina Veladero). En ambos tipos de análisis la variable dependiente fue el valor promedio de IVN de cada vega para cada estación de crecimiento y la variable independiente fue el tiempo en años ($n = 18$ años, Fig. 3). Para todas las vegas se cuantificaron dos cosas. Primero, y por cuenca estudiada, se cuantificó el porcentaje de vegas con tendencias significativamente distintas de 0 ($p < 0,05$), y segundo, el estimador de estas tendencias (pendiente de la regresión lineal entre IVN y tiempo en años). Con los estimadores de las pendientes se realizó un análisis de varianza no paramétrica (Kruskal Wallis) donde la variable dependiente fue la pendiente de la tendencia IVN-tiempo y el factor de clasificación fue la cuenca a la que pertenece cada vega. A su vez, y con el objetivo de conocer si el patrón de cambio de IVN fue continuo o presentó algún tipo de patrón disruptivo en el tiempo se compararon, y sólo para la cuenca Las Taguas (tanto aguas arriba como abajo), los modelos de regresión lineal simple versus aquel segmentado. Para ello, se utilizó el criterio de información AIC. En aquellas situaciones donde el modelo

segmentado fue mejor que el lineal (menor AIC) se analizó la forma de dicho patrón y el año de quiebre.

En segundo lugar, se analizó la tendencia temporal de la heterogeneidad del IVN de cada vega. Para ello, se estimó el coeficiente de variación espacial del IVN (CV espacial) en cada estación de crecimiento y para cada una de las vegas (Fig. 4). Luego, se analizó la tendencia temporal del CV espacial. Para ello, se realizó un análisis similar al planteado para el valor promedio de IVN (Fig. 5).

La cuantificación de los cambios de IVN y su heterogeneidad a través del tiempo son una medida del cambio en el funcionamiento. Sin embargo, estas tendencias pueden estar asociadas a cambios dictados por el clima y/o por el uso humano. Para discernir entre factores se realizó el análisis de varianza no paramétrico. El supuesto detrás de este análisis es que de existir un efecto climático es probable que tenga un impacto similar entre cuencas, y en cambio, aquellas cuencas con mayor presión humana tendrán tendencias diferentes de las dadas sólo por el clima.

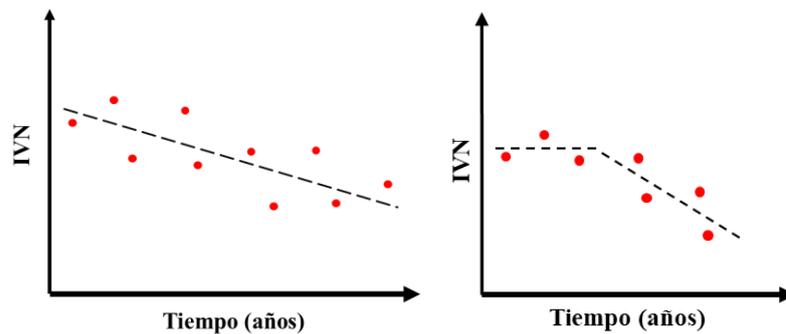


Figura 3 Esquema del análisis de regresión lineal (izquierda) y segmentado (derecha) de los valores promedio de IVN para cada vega para cada estación de crecimiento en función del tiempo (expresado en años).

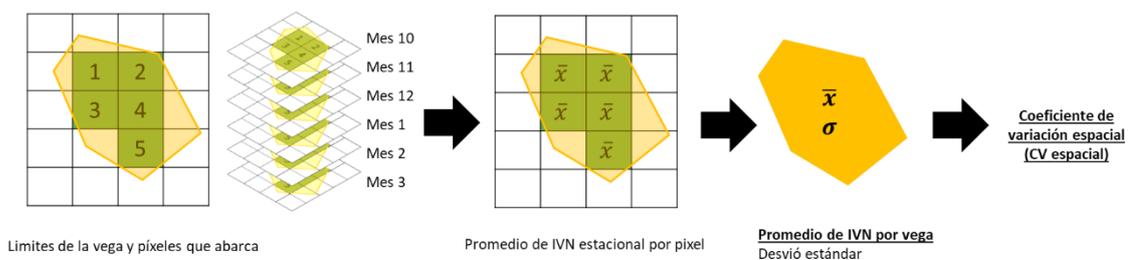


Figura 4 Secuencia de pasos realizados para obtener el IVN promedio y CV espacial para cada vega por estación de crecimiento. En **negrita y subrayado** las variables empleadas en los análisis.

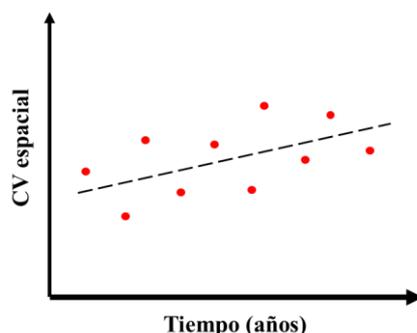


Figura 5 Esquema del análisis de regresión lineal de los valores promedio de CV espacial para cada vega para cada estación de crecimiento en función del tiempo (expresado en años).

A su vez, y para cuantificar de forma más directa el posible impacto de la mina Veladero sobre el funcionamiento de las vegas se realizó un análisis de regresión lineal simple donde las variables dependientes fueron los estimadores de cambio en las vegas (pendientes de valor medio de IVN y CV espacial de los modelos de regresión lineal simple) y la variable independiente fue la distancia al campamento, considerando sólo aquellas vegas con pendientes significativas ($p < 0,05$) y pertenecientes a la cuenca Las Taguas. El supuesto detrás de este análisis es que el impacto de la mina es mayor en las vegas cercanas respecto de aquellas más alejadas. Además, contar con las estimaciones de las vegas en los que ajustó mejor un modelo segmentado y el año de quiebre de estos frente los modelos de regresión lineal simple también contribuirían a identificar si el cambio fue antes o después de la instalación de la mina Veladero.

Por último, se calculó el Índice de Caracterización de Vegas (ICV, ecuación 1) para cada una de las vegas estudiadas.

$$ICV = IVN_{promedio} \times (1 - CV_{promedio}) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde $IVN_{promedio}$ representa la media de IVN para todo el período analizado y $CV_{promedio}$ representa el coeficiente de variación espacial, también promedio del período analizado. Este índice puede tomar valores tanto negativos como positivos, valores positivos se asocian a un alto IVN y baja heterogeneidad de éste. En cambio, sucede lo contrario con vegas con valores negativos de ICV.

Finalmente, y para evaluar de forma cuantitativa el modelo conceptual de estados y transiciones propuesto por Paruelo y Aguiar (2003) se realizó un análisis de tipos de cambios dominantes en las cuencas analizadas. Para ello, y con los estimadores de

tendencias del IVN y el CV espacial se generó un sistema de ejes cartesianos (Fig.6) y se graficó el tamaño de cada vega en función del valor del índice; también se describió el número de vegas de cada cuenca que se ubicó en cada cuadrante y el valor promedio del ICV por cuadrante.

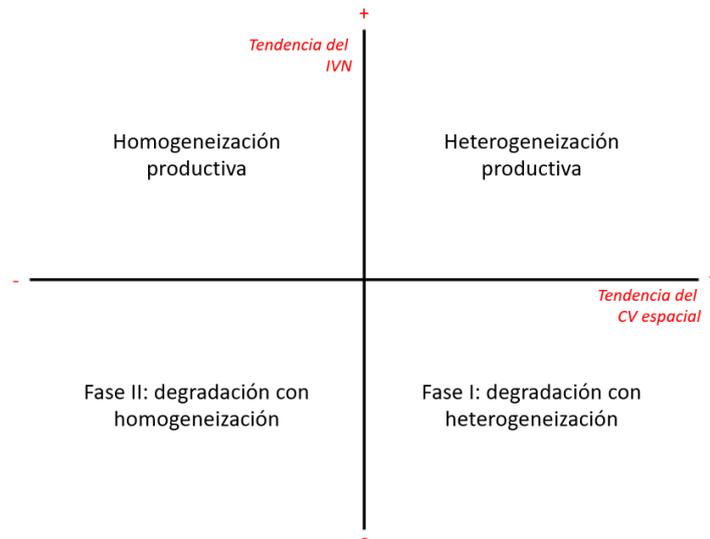


Figura 6 Cuadrantes sintéticos e indicadores del fruncimiento de las vegas estudiadas. Cuadrante I: representa un aumento de la heterogeneidad y de la productividad. Cuadrante II: representa un aumento de la productividad con homogeneización. Cuadrante IV: representa una disminución de la productividad con aumento de la heterogeneidad (*heterogeneización**), indicadora de una primera fase de degradación. Cuadrante III: representa una disminución de la productividad con disminución de la heterogeneidad, indicadora de una segunda fase de degradación. (Adaptado de Paruelo y Aguiar 2003).

Como se mencionó anteriormente, este trabajo se realizó en la plataforma Google Earth Engine, la cual provee un entorno de desarrollo y exploración interactiva de datos geoespaciales para el análisis científico. Se optó por el uso de dicha plataforma ya que entre sus ventajas se encuentra la capacidad de procesar rápidamente enormes cantidades de datos, posee un extenso catálogo de datos espaciales que facilita su acceso y un mecanismo de acceso uniforme a una variedad de tipos de datos, independientemente de sus bandas, proyección, profundidad de bits, resolución, etc (Gorelick, 2012). Los posts

* Se utiliza la palabra heterogeneización a pesar de no ser reconocida por la RAE porque su antónimo (homogeneización) si esta aceptado.

procesamientos fueron realizados con el software de acceso libre Quantum GIS (QGIS DevelopmentTeam, 2009). Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software Infostat (Di Rienzo et al., 2018). Los gráficos se realizaron con el software libre R studio (RStudioTeam, 2018).

Resultados

Objetivo específico a: Identificación de las vegas

De las 10 clases obtenidas en la clasificación se consideró “vegas” a todos aquellos píxeles contenidos en la clase de IVN más alta (Fig. 7). Esto se asocia a que son las áreas de más alta productividad. En total se identificaron 1.258 vegas, las cuales representaron, aproximadamente, un área de 1.900 ha.

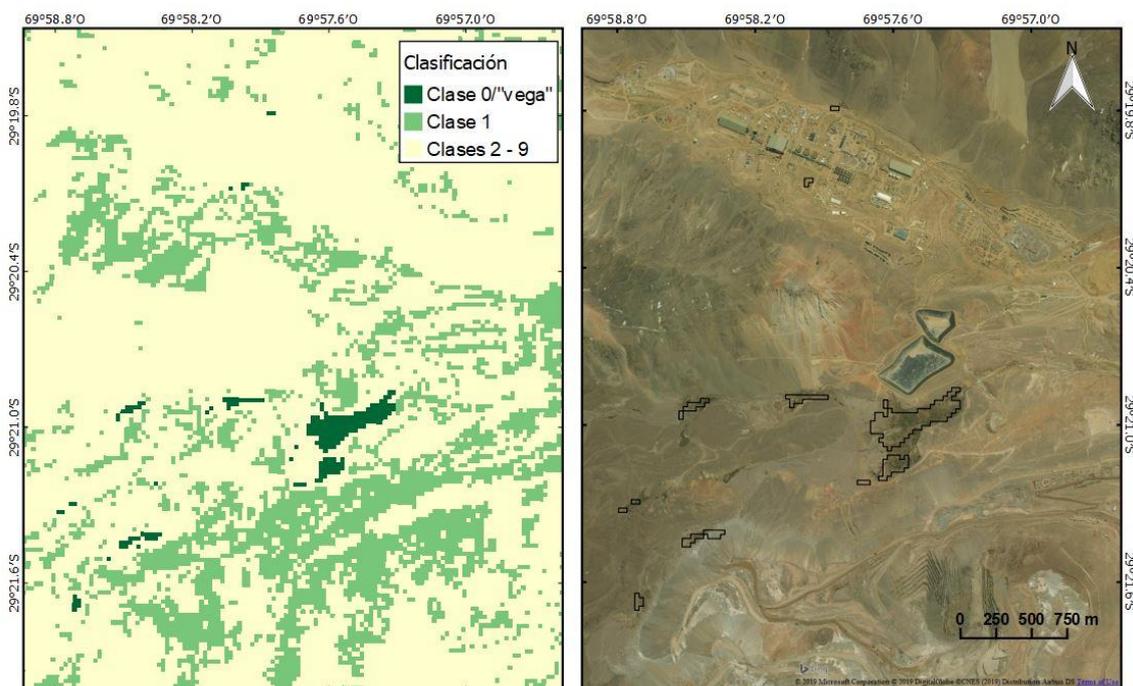


Figura 7 Panel de la izquierda: Clasificación no supervisada de una parte del área de estudio a modo de ejemplo. Panel de la derecha: Imagen de alta resolución de la misma porción. Delimitados con líneas negras las áreas clasificadas como vegas.

La cuenca que presentó mayor cantidad de área con vegas fue Blanco Norte, 708 ha en 482 vegas. El área por vega tuvo un rango de 0,18 ha a 40,5 ha. La segunda cuenca con más área de vega fue Blanco Sur, 622 ha en 327 vegas y variaron desde 0,27 a 31,14 ha. Para el caso de Aguas abajo se encontraron 233 áreas de vegas en un total de 358 ha y con rangos de tamaño similar a los de la cuenca Blanco Sur (0,18 a 31,59 ha). Valle del Cura presentó 118 áreas de vega en 120 ha, con áreas que van desde 0,18 a 15,66 ha. Asociadas a la cuenca del río La Palca se encontraron 77 áreas de vega en 68 ha, con

tamaños desde 0,18 hasta 11,7 ha. La cuenca Aguas arriba presentó el menor número de áreas de vega, 21, en 24 ha (en un rango de 0,18 a 7,02 ha; Tabla 1).

Tabla 1. Medidas resumen de la superficie (en hectáreas) de cada vega por cuenca.

<i>Cuenca</i>	<i>Promedio (ha)</i>	<i>Desvío estándar (ha)</i>	<i>Máx. (ha)</i>	<i>Mín. (ha)</i>	<i>Total (ha)</i>	<i>n</i>
<i>Blanco Norte</i>	1,47	3,29	40,5	0,18	708,03	482
<i>Blanco Sur</i>	1,90	3,87	31,14	0,27	621,54	327
<i>Aguas Abajo</i>	1,53	3,34	31,59	0,18	357,48	233
<i>Valle Del Cura</i>	1,02	1,84	15,66	0,18	120,15	118
<i>La Palca</i>	0,88	1,47	11,7	0,18	67,95	77
<i>Aguas Arriba</i>	1,15	1,53	7,02	0,18	24,21	21

Valor medio de IVN

Las vegas presentes en la cuenca del río Blanco Norte presentaron los mayores valores promedio de IVN para el periodo de estudio (0,350; n=8672, 482 vegas x 18 años), seguido por Aguas arriba (0,324; n=378, 21 vegas x 18 años), luego las vegas de Valle del Cura (0,323; n=2124, 118 vegas x 18 años), La Palca (0,316; n=1386, 77 vegas x 18 años), Aguas abajo (0,309; n=4194, 233 vegas x 18 años) y Blanco Sur (0,287; n=5886, 327 vegas x 18 años; Fig.8).

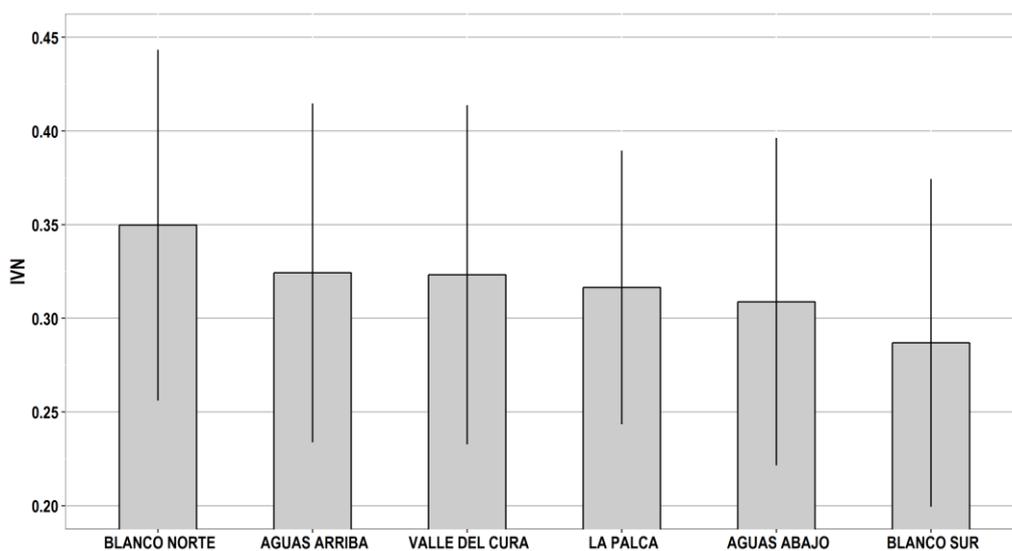


Figura 8 Valores promedio de IVN para cada cuenca en el total del periodo estudiado (n=22640, 1258 vegas x 18 años). Las líneas verticales representan el desvío estándar.

Objetivo específico b: Caracterización del funcionamiento

Tendencia temporal del promedio de IVN

En el 47% de las vegas se observó una tendencia distinta de cero ($p \leq 0,05$; $n=594$; 968,5 ha) en el IVN a través del tiempo, de las cuales el 86% fueron negativas ($n=511$; 855,8 ha) y solo el 14% ($n=83$; 112,7 ha) positivas. Entre cuencas, la que presentó el mayor porcentaje de vegas con tendencias distintas de 0 fue la del río Blanco Norte con 63% ($n=302$; 498,5 ha; Fig.9). El 94% ($n=283$; 474,6 ha) de estas fueron tendencias negativas y solo el 6% ($n=19$; 23,8 ha) positivas. Aguas arriba del campamento el 76% de las vegas presentaron tendencias distintas de 0 siendo todas negativas ($n=16$; 13 ha; Fig.9). En la cuenca Valle del Cura, el 37% de las vegas presentaron tendencias distintas de cero ($n=44$; 49 ha; Fig.9). De estas, el 75% ($n=33$, 38 ha) fueron negativas y el 25% restante ($n=11$; 11 ha) positivas. En la cuenca del río La Palca, el 31% de las vegas presentó tendencias distintas de 0 ($n=24$; 13,1 ha; Fig.9). El 67% ($n=16$; 10,1 ha) de estas fueron negativas y el 33% ($n=8$; 3 ha) restante positivas. En las vegas ubicadas Aguas abajo hubo 51% de casos con tendencias distintos de 0 ($n=118$; 190,7 ha; Fig.9). De estas el 97% ($n=114$; 189,3 ha) fueron negativas y sólo el 3% ($n=4$; 1,4 ha) positivas. Por último, la cuenca asociada al río Blanco Sur fue la que presentó el menor porcentaje de vegas con tendencias distintas de 0, solo el 28% ($n=90$; 204,1 ha; Fig.9). De éstas, el 54% ($n=49$; 130,7 ha) fueron negativas y el 46% ($n=41$; 73,4 ha) restante fueron positivas.

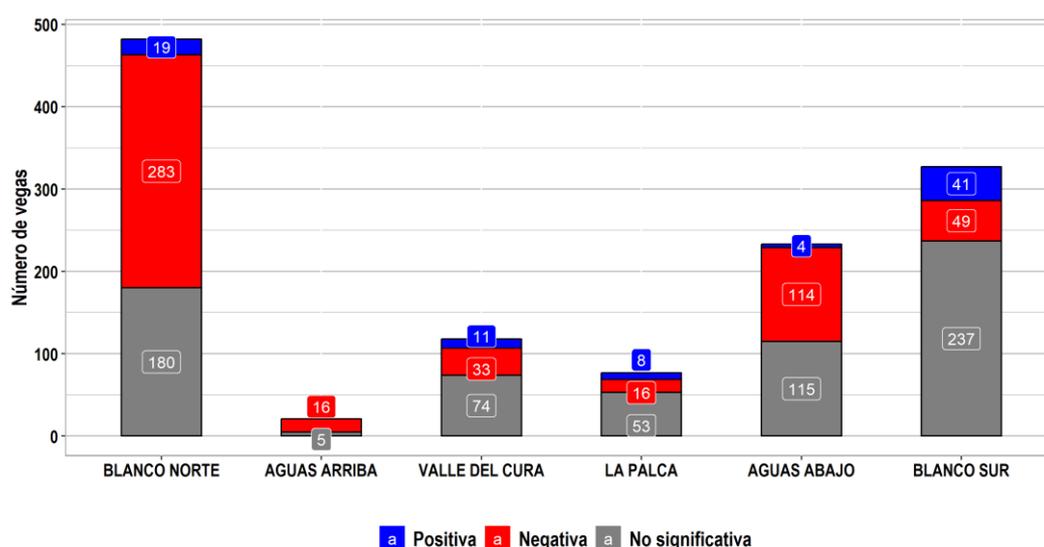


Figura 9 Número de vegas por cuenca diferenciando aquellas que presentaron una tendencia significativa de IVN en el tiempo de aquellas que no.

La intensidad de las tendencias significativas ($p < 0.05$) también fue diferente entre cuencas (Fig.10). En promedio, las vegas ubicadas Aguas arriba tuvieron las pendientes más abruptas, con una disminución media de 0,01 unidades de IVN por año (Fig.10). Las vegas ubicadas en la cuenca del río Blanco Norte presentaron valores de disminución similares a aquellas presentes Aguas abajo, pero diferentes a las de La Palca, Valle del Cura y Blanco sur (Fig.10; prueba de Kruskal Wallis; $H=44,91$; $p < 0,0001$).

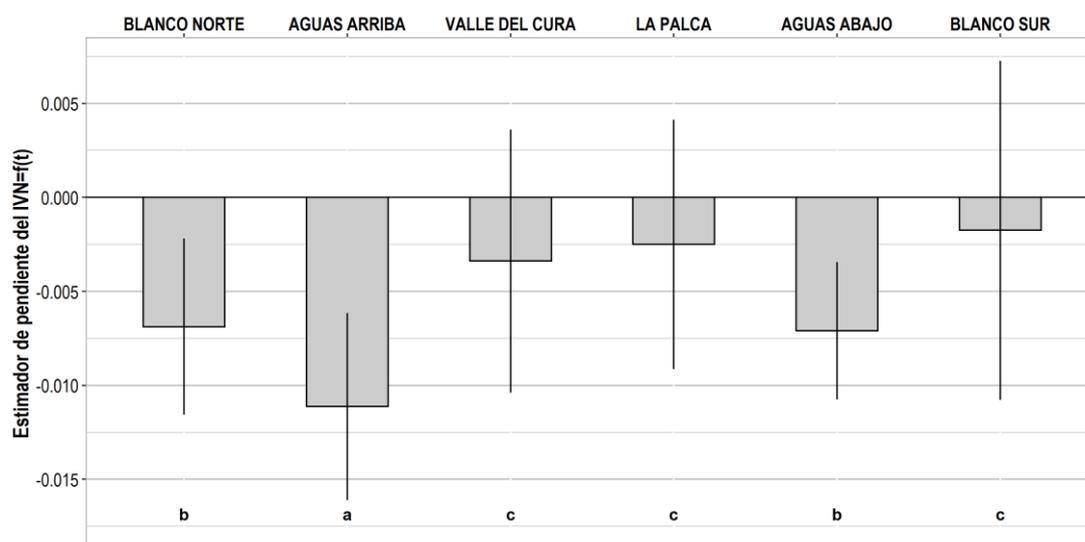


Figura 10 Estimadores de pendiente de $IVN=f(t)$ por cuenca. Cada barra representa el valor promedio de las pendientes significativas estimadas de la regresión lineal entre IVN y tiempo por cuenca. Letras distintas indican diferencias significativas entre los valores (prueba de Kruskal Wallis; $H=44,91$; $p < 0,0001$). Las líneas verticales representan el desvío estándar.

Modelo lineal vs. Modelo segmentado

En el 48% de las vegas ubicadas Aguas arriba ($n=10$) el modelo de regresión segmentada explicó mejor los patrones de variación del IVN a lo largo del tiempo. En el 38% ($n=8$) fue mejor el patrón lineal y en el 14% restante ($n=3$) no se observó una tendencia. Para el caso de las vegas ubicadas Aguas abajo ambos tipos de modelos explicaron prácticamente el mismo porcentaje de vegas 26% ($n=61$) para el modelo segmentado 27% ($n=62$) para el lineal y el restante 47% ($n=110$) sin tendencia.

En los casos en los que el modelo segmentado fue mejor se analizó el comportamiento de dichas tendencias no lineales (Figs. 11 y 12). En el 50% de las vegas Aguas arriba cuya tendencia fue mejor explicada por el modelo segmentado, presentaron una tendencia negativa en ambos periodos, pero sólo estadísticamente significativo el segundo tramo

(Fig. 11 panel izquierdo). El otro patrón de cambio que presentaron (30%, n=3), comenzaba con una tendencia significativa negativa y continuaba con una tenencia negativa no significativa (Fig.11 panel derecho). Para el primer patrón el 80% (n=4) de las veces tiene su año de quiebre (gamma) después de la instalación de la mina mientras que el 20 % (n=1) restante se concentra en los años anteriores (Fig. 11). El segundo patrón tuvo el 67%(n=2) de las veces con su año de quiebre después del 2005 dejando al otro 33% (n=1) los años anteriores (Fig. 11).

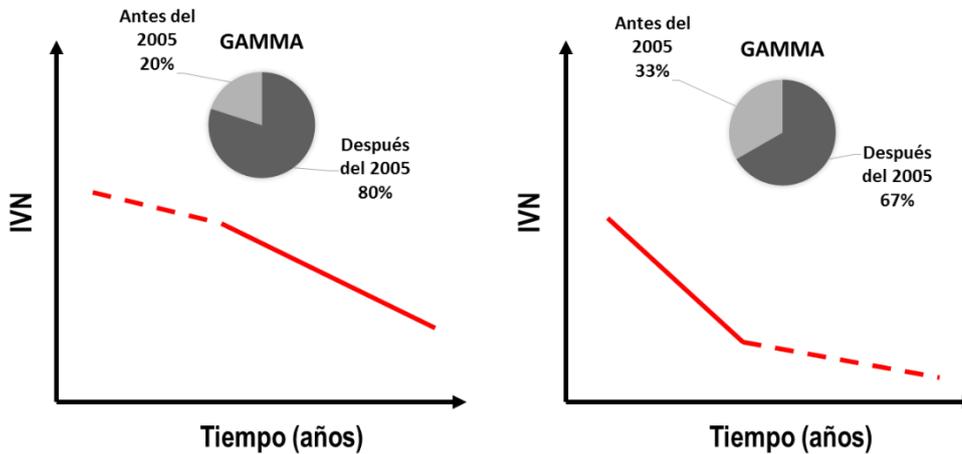


Figura 11 Esquema de los tipos de patrón de cambio de IVN según los dos modelos segmentados más frecuentes para la cuenca Aguas arriba. La línea llena indica que el estimador de la pendiente fue estadísticamente significativo y la línea discontinua lo contrario. En cada panel se indican las proporciones de veces según el momento en que se da el quiebre en el modelo segmentado (parámetro gamma).

De las 61 veces Aguas abajo que se ajustaron mejor al modelo segmentado el 39% (n=24) de ellas tuvieron una tendencia negativa en ambos periodos, pero sólo la segunda significativa (Fig. 12 panel izquierdo). Los otros dos patrones de cambios representativos para la cuenca presentaron tendencias significativas negativas y luego del quiebre sin tendencia (Fig.12 panel central y derecho) divididos por igual, tendencias negativas o positivas (20%, n=12 para cada caso). Para el primer patrón, en el 83% (n=20) de las veces del año de quiebre fue después de la instalación de la mina mientras que en el 17 % (n=4) restante en los años anteriores (Fig. 12 panel izquierdo). Para el segundo patrón, y con la segunda pendiente negativa, en el 83%(n=10) de las veces el año de quiebre fue después del 2005 (Fig. 12 panel central). En el 100% de las veces en los que la pendiente del

segundo segmento fue positiva tuvieron el año de quiebre luego de la instalación de la mina (Fig. 12 panel derecho).

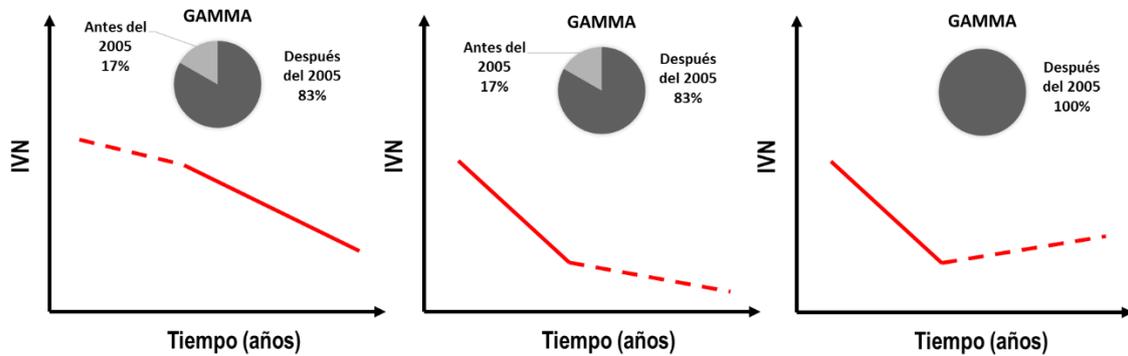


Figura 12 Esquema de los tipos de patrón de cambio de IVN según los tres modelos segmentados más frecuentes para la cuenca Aguas abajo. La línea llena indica que el estimador de la pendiente fue estadísticamente significativo y la línea discontinua lo contrario. En cada panel se indican las proporciones de veces según el momento en que se da el quiebre en el modelo segmentado (parámetro gamma).

Valor medio de CV

Las vegas presentes en la cuenca del río Blanco Norte presentaron un coeficiente de variación espacial (CV) promedio para el periodo de estudio de 13,6 % (n=7092, 394 vegas x 18 años). Mientras que las vegas Aguas arriba tuvieron el menor valor (11,9%; n=324, 18 vegas x 18 años), es decir fueron las más homogéneas internamente. El Valle del Cura (14,2 %; n=1638, 91 vegas x 18 años), La Palca (14,7 %; n=1152, 64 vegas x 18 años) y Aguas abajo (13,7%; n=3438, 191 vegas x 18 años) mostraron valores similares de CV. Por último, las vegas de la cuenca del río Blanco Sur tuvieron una heterogeneidad promedio mayor a la cuenca más homogénea (17,0%; n= 5274, 293 vegas x 18 años; Fig.13), es decir fueron las más heterogéneas internamente.

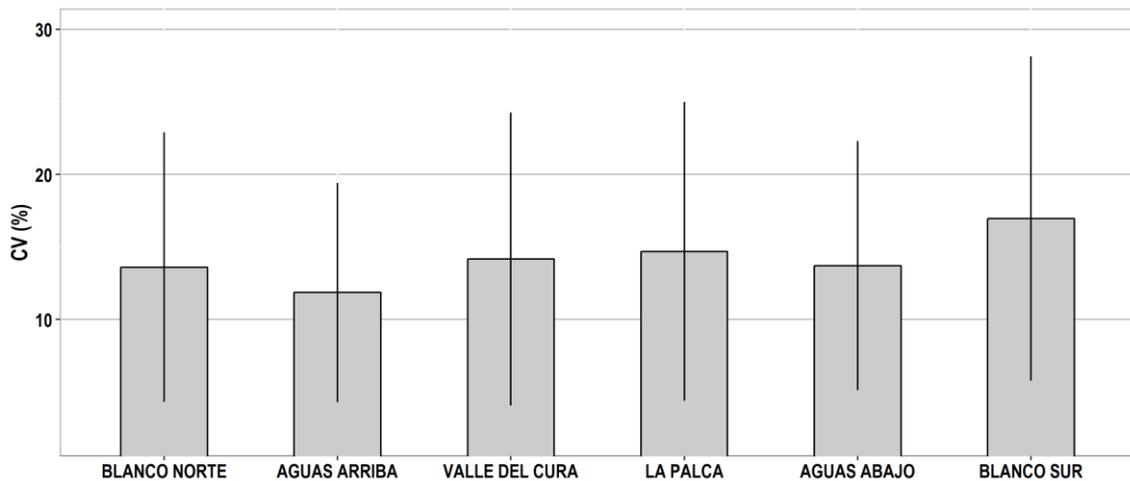


Figura 13 Coeficiente de variación espacial por cuenca. Valores promedio del CV espacial de las vegas insertas en cada cuenca en el total del periodo estudiado (n=18918, 1051 vegas x 18 años). Las líneas verticales representan el desvío estándar.

Tendencia temporal de la heterogeneidad

Sobre las 1051 vegas estudiadas el 39,5% de las mismas mostraron una tendencia significativa en la heterogeneidad a través del tiempo ($p \leq 0,05$; $n=415$; 679,5 ha; Fig.14). De las cuales el 65,3% ($n=271$, 378,5 ha) fueron negativas y el 34,7% restante ($n=144$, 301 ha) positivas. Entre cuencas, las asociadas al río Blanco Norte mostraron un 37,1% ($n=146$, 275,3 ha; Fig.14) de casos significativos. De los cuales el 22,6% ($n=89$; 114,3 ha) fueron tendencias negativas y el 14,5% restante ($n=57$; 161 ha) fueron positivas. Para las vegas ubicadas Aguas arriba, el 38,9% tuvieron tendencias distintas de cero ($n=10$; 7,5 ha; Fig. 14). De estas, el 22,2% ($n=4$; 4,1 ha) fueron negativas y 16,7% ($n=6$; 3, 4 ha) restante positivas (Fig.14). La cuenca del Valle del Cura mostró, junto con la cuenca Aguas abajo, el mayor porcentaje de casos significativos con un 44% ($n=84$, 39,7 ha; Fig.14). Por su parte, las vegas del Valle del Cura tuvieron el 35,2% ($n=32$; 26,1 ha) de tendencias negativas y sólo el 8,8% ($n=8$; 13,5 ha; Fig.14) de tendencias positivas. En las vegas asociadas al río La Palca el 43,8% presentó tendencias distintas de 0 ($n=28$; 37,1 ha; Fig.14). De estas, el 39,1% ($n=25$; 32,7 ha) fueron negativas y el 4,7% ($n=3$; 4,5 ha) restante positivas. Para el caso de Aguas abajo, el 23,6% ($n=45$; 61,4 ha) fueron tendencias positivas y el 20,4% restante ($n=39$; 72,4) fueron negativas (Fig.14). Por último, en la cuenca Blanco Sur el 37,5% de las vegas tuvo tendencias distintas de 0

(n=110;186 ha; Fig.14). De estas el 25,9% (n=76;139,8 ha) fueron negativas y el 11,6% restante (n=34; 46 ha) positivas.

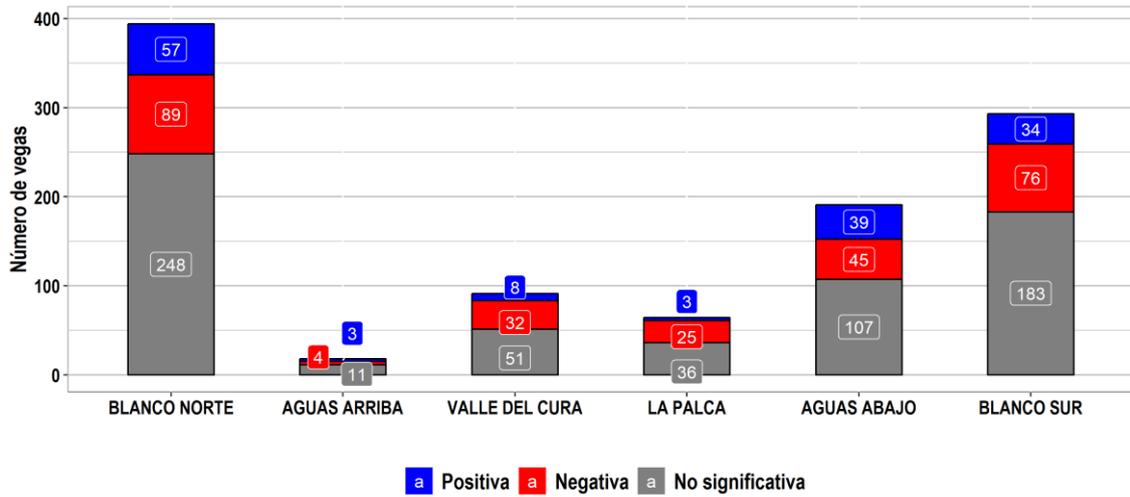


Figura 14 Número de vegas por cuenca diferenciando aquellas que presentaron una tendencia significativa del CV espacial en el tiempo de aquellas que no.

La intensidad en las tendencias del CV significativas también fue diferente entre cuencas (Fig.15). Las vegas asociadas al Valle del Cura presentaron una de las tendencias medias más altas de disminución de la heterogeneidad, 0,48% por año aproximadamente, seguidas por las asociadas a la cuenca La Palca y Blanco Sur (Fig.15). Las vegas asociadas a la cuenca Blanco Norte y Aguas abajo mostraron tendencias medias bajas de disminución de la heterogeneidad al punto de ser similares de tendencia de las vegas Aguas arriba donde heterogeneidad aumentó a una tasa anual cercana al 0,09%. (Fig.15).

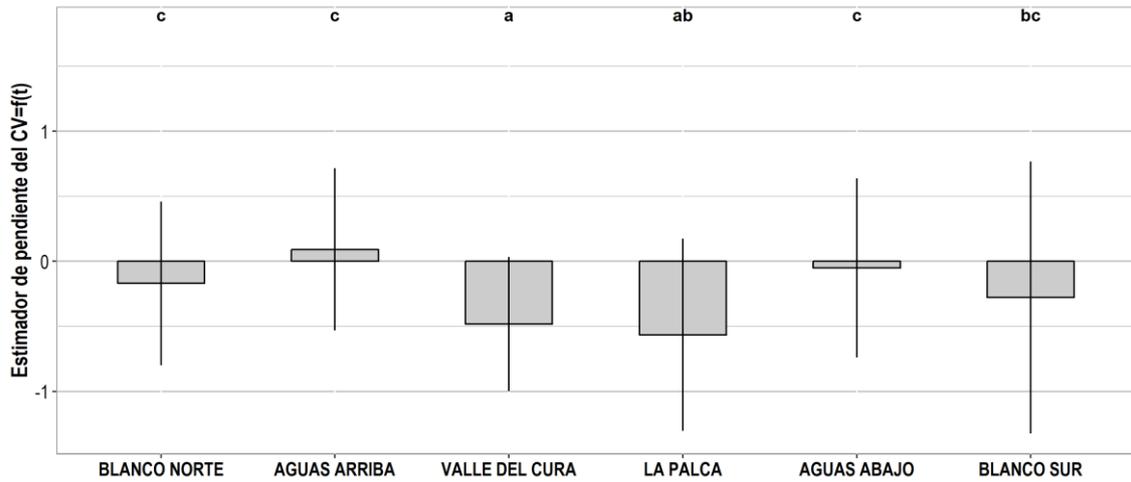


Figura 15 Estimadores de pendiente de $CV=f(t)$ por cuenca. Cada barra representa el valor promedio de las pendientes significativas estimadas de la regresión lineal entre CV y tiempo para cada cuenca. Letras distintas indican diferencias significativas entre los valores (prueba de Kruskal Wallis; $H= 34,19$; $p= <0,0001$). Las líneas verticales representan el desvío estándar.

Distancia a la Mina Veladero

La cercanía a la Mina Veladero tuvo un efecto significativo, pero bajo, sobre las pendientes de las tendencias en el tiempo del IVN (Fig. 16). Aquellas vegas ubicadas más cerca al campamento mostraron una disminución mayor en el IVN a través del tiempo (pendientes más negativas) que las vegas ubicadas a mayor distancia (Regresión lineal simple; $\text{estimador}=0,00004$; $p=0,0098$; $n=134$; $R^2=0,04225$; Fig. 16). Sin embargo, este modelo sólo explicó el 4% de las variaciones en las pendientes. A su vez, la heterogeneidad, medida a través de la tendencia en el CV espacial, no mostró ningún patrón de asociación con la distancia al campamento (Regresión lineal simple; $p=0,45$; $n=15$; $R^2=0,0$).

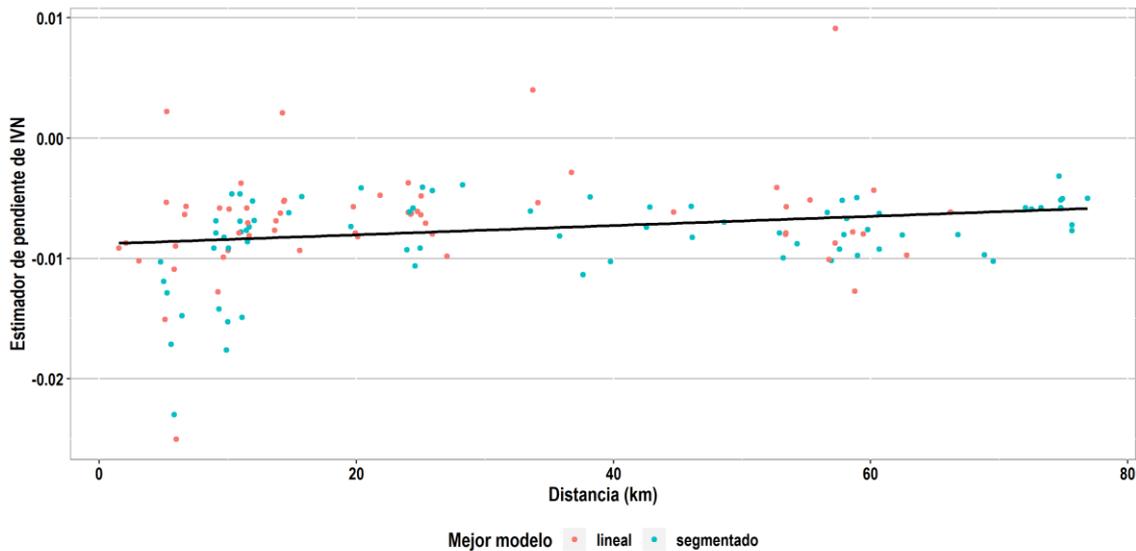


Figura 16 Asociación entre los estimadores de cambio en el IVN a través del tiempo (pendiente de la regresión lineal entre IVN y tiempo en años) y la distancia al campamento principal de la Mina de Veladero (n=134; p=0,0098; R²=0,04225). En colores distintos se diferencian los tipos de modelo que mejor explicaron las tendencias en el tiempo del IVN.

Síndromes de cambio en las áreas de vega

Las vegas que presentaron tendencias significativas en el IVN y/o en su heterogeneidad se distribuyeron de forma diferente entre los cuatro cuadrantes que sintetizan los síndromes de cambio posibles (Fig. 17). El 80% (n=548) de estas vegas se concentraron dentro de los síndromes que sintetizan las dos fases de degradación. La distribución entre fases fue similar. El 41% (n=282), estuvo asociado a la fase II (cuadrante III), es decir degradación con homogeneización y el 39% (n=266) restante se asoció a la fase I (cuadrante IV), degradación con heterogeneización. En cambio, los cuadrantes que se asocian a incremento del IVN, con el 20% (n=136) de las vegas, presentaron una distribución asimétrica de la cantidad de casos. La fase de homogeneización productiva (cuadrante II) representó el 17% (n=115) y sólo el 3% (n=21) restante la de heterogeneización productiva (cuadrante I; Fig. 17). El índice de caracterización de vega fue mayor en ambas las fases de degradación (prueba de Kruskal Wallis; H= 53,99; p= <0,0001; Fig. 17). Entre ellas la que mostró un ICV mayor fue la fase I (cuadrante IV, degradación con heterogeneización) con un ICV promedio de 0,3 mientras que la fase II (cuadrante III, degradación con homogeneización) tuvo un ICV promedio de 0,28.

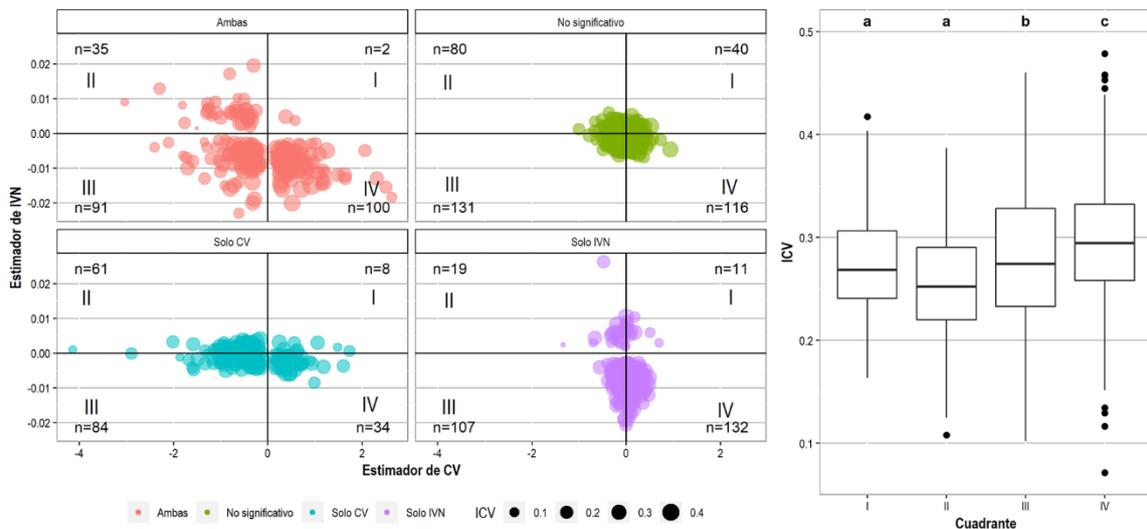


Figura 17. Cuadrantes representativos de los síndromes de cambio de las áreas de vega. Cada círculo representa una vega para la cual se estimó la tendencia de cambio en el IVN y en su CV espacial (n=1258). En verde las vegas con ambos estimadores no significativo. En rojo se indican las vegas que presentaron tendencias significativas en ambos estimadores, en celeste sólo para el CV espacial y en lila aquellas que presentaron tendencias significativas sólo para el IVN. El tamaño del punto es proporcional al valor de índice de caracterización de vega (ICV). A la derecha la distribución de ICV por cuadrante sólo considerando los datos significativos. Letras distintas indican diferencias significativas (prueba de Kruskal Wallis; $H= 53,99$; $p= <0,0001$).

Los síndromes de cambio presentaron diferente importancia relativa entre cuencas. En la cuenca Aguas abajo de la mina Veladero, el 93% de las vegas se asociaron de forma proporcional a las dos fases de degradación, 50% a la fase I de degradación (cuadrante IV), y 43% a la fase II (cuadrante III; Fig. 18). Algo similar ocurrió con las vegas asociadas a la cuenca Aguas arriba, donde 100% de las vegas se asociaron con las 2 fases de degradación ubicándose el 53% en la fase I (cuadrante IV) y 47% en la fase II (cuadrante III). En la cuenca del río Blanco Norte ambas fases de degradación concentraron el 90% de vegas y dividiéndose en proporciones similares de 46% para la fase II (cuadrante III) y 44% para la fase I (cuadrante IV). En cambio, en la parte sur del río Blanco, las fases de degradación condensaron el 58% de las vegas, distribuyéndose el 28% de los casos en la fase I (cuadrante IV) y el 30% restante en la fase II de degradación (cuadrante III). En la cuenca del río La Palca, el 62% de las vegas se ubicó en alguna de las fases de degradación, siendo el 49% en la fase II (cuadrante III) y el 13% restante en la fase I (cuadrante IV). Finalmente, el 56% de las vegas ubicadas en la cuenca del Valle

del Cura, se asoció a alguna de las fases de degradación, 35% en la fase II (cuadrante III) y el 22% restante en la fase I (cuadrante IV; Fig. 18).

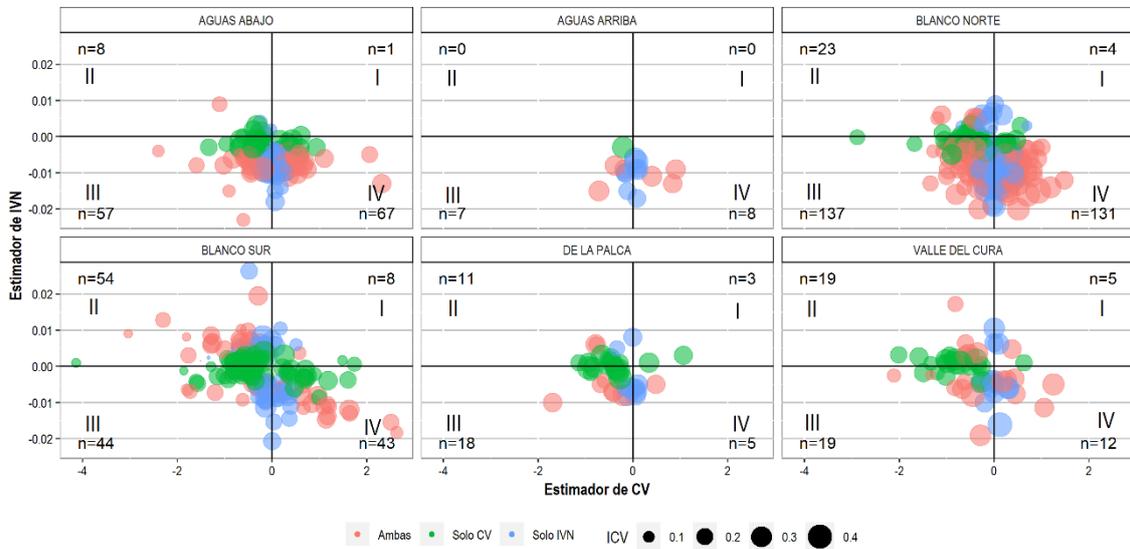


Figura 18 Cuadrantes representativos de los síndromes de cambio de las áreas de vega por cuenca para las vegas con tendencias distintas de 0 (valor $p < 0,05$). Cada círculo representa una vega para la cual se estimó la tendencia de cambio en el IVN y en su CV espacial. En rojo se indican las vegas que presentaron tendencias significativas en ambos estimadores, en verde sólo para el CV espacial y en celeste aquellas que presentaron tendencias significativas sólo para el IVN. El tamaño del punto es proporcional al valor de índice de conservación de vegas (ICV). N = al número de datos correspondiente para cada cuadrante.

Discusión

A partir de este trabajo de tesis se describió por primera vez la variación espacial y temporal del IVN, estimador directo de la PPNA, en vegas del noroeste de San Juan cercanas al proyecto minero de gran envergadura conocido como Veladero, y de otras que no están dentro de la misma cuenca. Como consecuencia de esta descripción, se observó que en el 47% de las vegas hubo una tendencia en el IVN a través del período analizado (1999-2017). La mayoría de estas tendencias, 86%, fueron negativas. Por su parte la heterogeneidad del IVN, medida a través del CV espacial, presentó una tendencia en el tiempo en el 39,5 % de las vegas analizadas, siendo en el 65,3 % negativa. Las vegas insertas en la misma cuenca que el proyecto minero de Veladero no presentaron un patrón de cambio en el IVN extremadamente diferente al observado en vegas de otras cuencas, incluso de aquellas insertas en el Parque Nacional San Guillermo (Blanco Norte). Sin embargo, se destacaron dos patrones en el funcionamiento de las vegas cercanas a la mina. El primero, que la intensidad de disminución del IVN en las vegas aguas arriba de la Mina fue más marcado que en el de las vegas de otras cuencas (Fig.10). El segundo, un efecto menor por la cercanía a la mina (Fig.16). Aquellas vegas ubicadas a menor distancia presentaron un patrón de disminución del IVN a través del tiempo más marcado que aquellas que se ubicaron más lejos. Sin embargo, esta intensidad de disminución no es diferente de la observada en vegas de otras cuencas, lejos de la mina Veladero.

El impacto de la sequía parece ser un fenómeno que incide fuertemente en el funcionamiento de estos ambientes. Por ejemplo, en vegas cercanas, pertenecientes al departamento de Calingasta (Castro y Wursten, 2017) se observó que durante el período 2000 a 2015 hubo una disminución en los valores promedio de IVN con el paso del tiempo. En vegas de otras regiones, en la Puna argentina, mostraron proporciones similares de tendencias positiva y negativa en la PPNA para el periodo del 2000-2009, aunque fueron levemente mayores las positivas (Baldassini et al., 2010). Más aun, en esta región se analizó la relación entre el área de los lagos en la Puna y el IVN de las vegas circundantes. En uno de los 15 lagos estudiados, Pozuelos, el tamaño del lago se asoció positivamente con el IVN (Casagrande et al., 2019). En vegas asociadas a la Patagonia extra-Andina, y para el período 2000-2015, también se observó una tendencia de la PPNA estimada a partir de información satelital en el 34% de las vegas estudiadas, en su mayoría fueron negativas (Merlo et al., 2017). En otras partes del mundo, y en humedales insertos en zonas áridas se han observado tendencias negativas en el IVN a través del tiempo

(Thakur et al., 2012, Petus et al., 2013). El mecanismo asociado a los patrones de disminución parece asociarse a que el incremento en la temperatura y la disminución en las precipitaciones alteraría la productividad en estos ambientes húmedos al aumentar la evapotranspiración y, con ella, el déficit hídrico (Joyce et al., 2016).

En el caso de vegas insertas en zonas áridas de ambientes montañosos, como los estudiados en esta tesis, estas disminuciones podrían estar asociadas a la disminución de las precipitaciones que, sumado al aumento de la temperatura, origina un retroceso de los glaciares indicando una pérdida en la reserva de agua (Boninsegna y Villalba, 2008; Boninsegna, 2013). En particular, un estudio reciente demostró que en el periodo 2000-2018 las masas de hielo glaciar en los Andes centrales han disminuido (Dussailant et al., 2019). Esto coincide con un estudio local que demostró la correlación que existe entre la disminución del derrame anual de los ríos con la disminución del IVN de vegas para el período 2000-2015 (Wurstten et al., 2017).

Por su parte las actividades humanas, y como se mencionó anteriormente, no parecen generar patrones diferentes a los asociados al clima. Sin embargo, parece exacerbarlos levemente. Futuras investigaciones podrían abordar la aproximación de estudio de las tendencias de los residuales de los modelos de asociación entre funcionamiento y clima (Evans y Geerken, 2004; Wessels et al., 2004; Kaptué et al., 2015). Esta aproximación se basa en analizar la tendencia de lo “no explicado” por factores ambientales. En el caso de las vegas de zonas áridas el desafío pasa por determinar cuáles son los factores ambientales que mejor explican las variaciones en el funcionamiento. En este sentido, y como ya se mencionó, la temperatura parece incidir de forma negativa incrementado la evapotranspiración (Joyce et al., 2016). Pero, resulta en un desafío mayor determinar el aporte de agua, ya que no se asocia directamente a la lluvia del lugar, sino por la vía de descongelamiento de las altas cumbres. En este sentido, puede ser importante evaluar la asociación entre funcionamiento y caudal de los ríos de cada cuenca.

Finalmente, y asociado al modelo conceptual propuesto por Paruelo y Aguiar (2003) se observó que ambas fases de degradación fueron dominantes en la región de estudio, aunque con proporciones diferentes entre estas. Las vegas ubicadas Aguas abajo como arriba y las de Blanco Norte se asociaron fuertemente a las fases de degradación. Es probable que en estas vegas el proceso de degradación se esté dando por un cambio en el patrón de riego natural (Paruelo y Aguiar 2003). Al disminuir el nivel de agua que avanza por los canales de riego natural (ríos) estos se vuelven vías de escurrimiento del agua

provocando que las áreas de vega más lejanas a dicho canal se sequen más rápido y, por ende, baje el nivel de IVN. Por su parte y sorprendentemente en vegas asociadas a las cuencas de los ríos Valle del Cura, La Palca y Blanco sur se dio el fenómeno de incremento del IVN y disminución del CV espacial, claramente asociado a obras de riego que permiten una mejor, y mayor distribución del agua dentro de una vega.

Conclusiones

A través de la plataforma Google Earth Engine logré estudiar la variación en el funcionamiento de las vegas en el noroeste de la provincia de San Juan en el período 1999-2017 considerando el efecto de la sequía y la instalación de la mina de Veladero. En particular, a través del uso de una clasificación no supervisada logré determinar la ubicación de 1900 ha de vegas en cinco cuencas diferentes. Además, mediante el entorno geográfico del programa QGIS logré discernir la distancia de las vegas ubicadas en el entorno del campamento de la mina Veladero, tanto aguas arriba como abajo de dicho proyecto. Por último, describí los cambios del IVN y su CV espacial para cada una de las vegas, y así evaluar el efecto relativo de la mina Veladero sobre el funcionamiento de estos ecosistemas.

Los resultados obtenidos a partir de este trabajo pueden representar una herramienta de soporte para la toma de decisiones con relación a mitigar el impacto que puede tener el Cambio Climático, y las actividades humanas que perjudiquen la provisión de servicios de las vegas de la zona estudiada. La forma de proveer soporte para la toma de decisiones podría hacerse por al menos dos vías. La primera, al contar con información espacialmente explícita sobre las vegas afectadas, y la intensidad de dicho efecto permitiría definir niveles de prioridad para la restauración de estas áreas. Dicha prioridad, podría surgir de la ponderación entre el nivel de degradación de una vega y, por ejemplo, la distancia a poblados (una medida de población vulnerable). Por otro, al contar con una desagregación del efecto negativo, disminución del nivel de productividad y cambio en la heterogeneidad, permite pensar en la forma de intervención para revertir dichos procesos. En aquellas zonas que se encuentran en la fase I de degradación, y asociado a la cercanía a la Mina Veladero, se podría proponer la reasignación de agua de riego, al menos parcial, para evaluar si esto mitiga dicho efecto. En cambio, en aquellas zonas en la fase II de degradación, además de reasignar agua, sería necesario la construcción de obras civiles que permitan retener el agua de escorrentía más tiempo dentro de las vegas, para así aumentar el proceso de infiltración.

Bibliografía

- Aedo, M. P. y Montecinos, T. 2011. Glaciares andinos: recursos hídricos y cambio climático: desafíos para la justicia climática en el Cono Sur.
- Bianchini, F. 2011. Impacto de los emprendimientos Veladero y Pascua Lama sobre los recursos hídricos de la provincia de San Juan. *Centro de Derechos Humanos y Ambiente (CEDHA)*.
- Boelcke, O. 1957. Comunidades del Norte de la Patagonia y sus relaciones con la ganadería. *Revista de investigaciones agropecuarias*. 11, 5-98.
- Boninsegna, J. A. 2014. Impacto del cambio climático en los oasis del oeste argentino. Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias. *Ciencia e Investigación*; 64; 1; 45-58.
- Boninsegna, J. A. y Villalba, R. 2008. Documento marco sobre la oferta hídrica en los oasis de riego de Mendoza y San Juan en escenarios de cambio climático. *Iª Reunión Internacional de Riego INTA EEA Manfredi*
- Brenning, A. y Azócar, G. F. 2010. Minería y glaciares rocosos: impactos ambientales, antecedentes políticos y legales, y perspectivas futuras. *Revista de Geografía Norte Grande*. 47, 143-158.
- Cabrera, A.L. 1971. Fitogeografía de la República Argentina. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*. 14, 1-42.
- Castro, L. Wurstten, A. 2017. Análisis de la variación de la productividad de humedales de montaña asociado a las variaciones del derrame anual del río San Juan en un periodo de quince años en el departamento Calingasta. *I Congreso Binacional de Investigación Científica (Argentina-Chile) V Encuentro de Jóvenes Investigadores*, San Juan, Argentina.
- Chapin, F.S.I.; Matson, P. y Vitousek, P. 2011. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. *Springer US*. pp, 297–320.
- Di Rienzo J.A.; Casanoves F.; Balzarini M.G.; Gonzalez L.; Tablada M.; Robledo C.W. InfoStat versión 2018. Centro de Transferencia InfoStat. FCA. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, URL <http://www.infostat.com.ar>

- Dussailant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., Rabatel, Pitte, P. and A. Ruiz, L. (2019). Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nature Geoscience*, 1-7. I.
- Garbulsky, M.F., Peñuelas, J., Gamon, J., Inoue, Y. y Filella, I. 2011. The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies. A review and meta-analysis. *Remote Sense Environment*. 115, 281–297. doi:10.1016/j.rse.2010.08.023
- Gorelick, N. 2012. Google earth engine Unión Geofísica Americana. *Fall Meeting Abstracts*.
- Greenpeace, 2011. Barrick: Minería responsable de destruir los glaciares.
- Evans, J., y Geerken, R. (2004). Discrimination between climate and human-induced dryland degradation. *Journal of Arid Environments*, 57(4), 535-554.
- Izquierdo, A. E., Aragón, R., Navarro, C. J. y Casagrande, E. 2018. Humedales de la Puna: principales proveedores de servicios ecosistémicos de la región. La Puna argentina: naturaleza y cultura. *Serie de Conservación de la Naturaleza*. 24, 96-111.
- Izquierdo A, E., Grau H, R., Carilla J, y Casagrande, E. 2015a. Side effects of green technologies: the potential environmental costs of Lithium mining on high elevation Andean wetlands in the context of climate change. *GLP-News*. 12: 53-56.
- Izquierdo A. E., Foguet J. y Grau H. R. 2015b. Mapping and spatial characterization of Argentine High Andean peatbogs. *Wetlands Ecology and Management*. 23:963-976.
- Izquierdo A. E., Foguet J. y Grau H. R. 2016. “Hidroecosistemas” de la Puna y Altos Andes de Argentina. *Acta Geológica Lilloana*. 28: 390-402.
- Joyce, C. B.; Simpson, M. y Casanova, M. 2016. Future wet grasslands: ecological implications of climate change. *Ecosystem Health and Sustainability*. 2:9. e01240. DOI: 10.1002/ehs2.1240
- Kang, X.; Hao, Y.; Cui, X.; Chen, H.; Huang, S.; Du, Y.; Li, W.; Kardol, P.; Xiao, X. y Cui, L. 2016. Variability and changes in climate, phenology, and gross primary production of an alpine wetland ecosystem. *Remote Sensing*. 8(5). 391.

- Kaptué, A. T., Prihodko, L., y Hanan, N. P. (2015). On greening and degradation in Sahelian watersheds. *Proceedings of the national academy of sciences*, 112(39), 12133-12138.
- León, R. J., Bran, D., Collantes, M., Paruelo, J. M., y Soriano, A. 1998. Grandes unidades de vegetación de la Patagonia extra andina. *Ecología austral*. 8(2), 125-144.
- Martinez Carretero E. y Ontivero, M. 2013. El ecosistema de vega en el Corredor Bioceánico (San Juan, Argentina) mediante el empleo de TIG. En García, A.(Ed.), *El Corredor Bioceánico en San Juan. Recursos culturales y naturales del sector andino* (21-29), San Juan: Editorial Universidad Nacional de San Juan.
- Merlo 2017. Variación espacial y temporal de la producción primaria neta aérea de mallines de la Patagonia. Trabajo de intensificación para optar por el título de Ing. Agr. FAUBA. Director: JGN. Irisarri; Codirector: M. Oesterheld. Defensa 11-12-2017. 37 páginas.
- Miranda, O., Liotta, M., Olguin, A., y Degiorgis, A. (2010). El consumo hídrico de la agricultura y la minería aurífera en la cuenca del Río Jáchal, provincia de San Juan, Argentina. *VII Jornadas de actualización en riego y fertirriego AQUA-LAC*. 2(1).68-77.
- Monteith, J.L. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*. 9, 747-66.
- Neiff, J. J. 2001. Humedales de la Argentina: sinopsis, problemas y perspectivas futuras. *El Agua en Iberoamerica. Funciones de los humedales, calidad de vida y agua segura* (AF Cirelli. ed.), CYTED, Argentina, 83-112.
- Oesterheld M., Oyarzabal, M. y Paruelo, J. 2014. Aplicación de la teledetección y los sistemas de información geográfica al estudio y seguimiento de los sistemas ganaderos. En Paruelo J. M.; Di Bella, C. y Milkovic M. (Eds). *Percepción remota y sistemas de información geográfica: sus aplicaciones en agronomía y ciencias ambientales* pp283-301. 1er Edición. CABA: Hemisferio Sur.
- Oller, P., Stoffel, L., Janeras, M., Arnó, G., de Buén, H., y Arancibia, R. 2008. Análisis del riesgo de aludes en la ruta de acceso a mina Veladero (Departamento de San

- Juan, Argentina) y estudio de alternativas de defensa. *Proceedings 3th Jornada Tècnica de Neu i Allaus, Betren–Val d'Aran*.
- Paruelo, J.M. y A.M.R., 2003. Impacto humano sobre los ecosistemas: El caso de la desertificación. *Ciencia. Hoy* 13, 48–59.
- Paruelo, J.M., Golluscio, R.A. y Guerschman, J.P. 2004. Regional scale relationships between ecosystem structure and functioning: the case of the Patagonian steppes. *Global Ecology and Biogeography*. 13 (5), 385–395.
- Paruelo, J. M. 2008. La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Revista Ecosistemas*. 17 (3), 4-22.
- Petus, C., Lewis, M., y White, D. (2013). Monitoring temporal dynamics of Great Artesian Basin wetland vegetation, Australia, using MODIS NDVI. *Ecological indicators*. 34, 41-52.
- QGIS Development Team, 2009. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation. URL <http://qgis.org>
- RStudio Team (2018). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA URL: <http://www.rstudio.com/>.
- Soriano, A. 1956. Aspectos ecológicos y pastoriles de la vegetación patagónica relacionados con su estado y capacidad de recuperación. *Ministerio de Agricultura y Ganadería. Dirección General de Investigaciones Agrícolas. Instituto de Botánica*.
- Taillant, J. D. 2012. El Ambiente Periglacial y La Minería en la República Argentina. *Centro de Derechos Humanos y Ambiente (CEDHA)*.
- Taillant, J. 2013. Los Glaciares de Barrick Gold. Informe Técnico sobre el Impacto de Barrick Gold en Glaciares en los Proyectos Mineros de Veladero y Pascua Lama. *Centro de Derechos Humanos y Ambiente (CEDHA)*.
- Thakur, J. K., Srivastava, P. K., Singh, S. K., y Vekerdy, Z. 2012. Ecological monitoring of wetlands in semi-arid region of Konya closed Basin. Turkey. *Regional Environmental Change*. 12(1), 133-144.
- Wessels, K. J., Prince, S. D., Frost, P. E., y Van Zyl, D. (2004). Assessing the effects of human-induced land degradation in the former homelands of northern South

Africa with a 1 km AVHRR NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, 91(1), 47-67.

Wurstten, A.; Ontiveo, M.; Garces, G.y Castro, L. 2017.Variación temporal de la productividad de humedales de montaña durante un periodo húmedo y un periodo seco, en la cuenca del río San Juan, departamento Calingasta, provincia de San Juan, Argentina. Jornada.XXXVI *Jornadas Argentinas de Botánica y XXVIII Reunión Anual de la Sociedad de Botánica de Chile*.Mendoza, Argentina.

Zhao, M.y Running, S.W., 2010.Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009.*Science* 329, 940-943.