



Convenio de Asistencia Técnica INTA – The Nature Conservancy

Informe Final

Cartografía del estado de degradación de las pasturas del Gran Chaco Americano



Cartografía del estado de degradación de las pasturas del Gran Chaco Americano

Gaitán, J.J.^{1,2,3}; Acuña, F.⁴; Agüero, W.⁵; Álvarez, C.A.⁶; Ballón, M.⁷; Banegas, N.⁷; Barraza, G.⁴; Bassanetti, A.⁸; Blanco, L.⁵; Caballero, E.⁹; Cavallero, M.I.¹⁰; Céspedes, F.E.¹¹; Córdoba, A.⁴; Cortez, D.⁵; De Abelleira, D.¹²; Fernández, H.¹³; Flores, J.¹⁴; Gándara, L.¹⁴; Garay, D.⁵; Gerlero, G.D.¹⁵; Goytía, Y.⁹; Guimarães Ferreira, L.¹⁶; Kloster, N.¹⁷; Kurtz, D.¹⁴; Lara, J.⁷; Ledesma, R.⁴; Lértora, R.⁹; Llorvandi, C.⁴; López Morillo, C.¹³; López, J.⁴; Matorras, B.¹⁰; Mónaco, I.P.¹¹; Moreno, R.¹⁸; Mosciaro, M.J.⁸; Murray, F.¹⁹; Navarrete, V.⁴; Nanning, F.⁶; Oliveira-Santos, C.¹⁶; Oviedo, E.⁷; Peiretti, J.⁸; Pelliza, E.⁵; Peña, Y.P.¹⁰; Pereira, M.M.¹⁴; Pereyra, D.⁵; Pérez, M.¹⁷; Piedrasanta, R.⁴; Pinto, J.J.¹⁰; Pisano, P.⁴; Pueyo, J.D.⁶; Radrizzani, A.⁷; Reinaldi, J.A.¹⁵; Renaud, D.⁹; Rojas, J.⁹; Roldán, M.F.⁹; Sánchez, H.¹⁸; Saracco, F.⁴; Sentana, A.⁸; Sleiman, L.⁷; Speranza, F.¹³; Suarez, A.⁷; Tejerina Díaz, F.G.⁸; Tomaneck, E.¹⁰; Valiente, S.O.¹⁵; Varlamoff, N.B.⁸; Vera, H.D.¹⁰; Verón, S.R.¹²; Viana, A.⁷; Vieira Mesquita, V.¹⁶; Volante, J.N.⁸; Wolf Celoné, U.I.¹⁵; Ybarra, D.D.¹⁴

(1) Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Instituto de Suelos-CNIA, Hurlingham, Buenos Aires, Argentina.

(2) Universidad Nacional de Luján, Departamento de Tecnología. Lujan, Buenos Aires, Argentina.

(3) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina (CONICET), Buenos Aires, Argentina.

(4) INTA, EEA Santiago del Estero. Santiago del Estero, Argentina.

(5) INTA, EEA La Rioja. Chamental, La Rioja, Argentina.

(6) INTA, EEA El Colorado. El Colorado, Formosa, Argentina.

(7) INTA, IIACS Leales. Leales, Tucumán, Argentina.

(8) INTA, EEA Salta. Salta, Argentina.

(9) INTA, EEA Sáenz Peña. Sáenz Peña, Chaco, Argentina.

(10) INTA, EEA Ingeniero Juárez. Ingeniero Juárez, Formosa, Argentina.

(11) INTA, EEA Colonia Benítez. Colonia Benítez, Chaco, Argentina.

(12) INTA, Instituto de Clima y Agua. Hurlingham, Buenos Aires, Argentina.

(13) INTA, EECT INTA Yuto. Yuto, Jujuy, Argentina.

(14) INTA, EEA Corrientes. Corrientes, Argentina.

(15) INTA, EEA Quimilí. Quimilí, Santiago del Estero, Argentina.

(16). LAPIG. Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento da Universidade Federal de Goiás, Brasil.

(17) INTA, EEA Anguil. Anguil, La Pampa, Argentina.

(18) INTA, EEA Famaillá. Famaillá, Tucumán, Argentina.

(19) INTA, AER San Luis. San Luis, Argentina.

Introducción

El Gran Chaco Americano (en adelante el Chaco) es la ecorregión boscosa más extensa del continente después del Amazonas y la más grande de bosques secos de América del Sur. Se extiende desde latitudes tropicales (18°S) hasta ambientes subtropicales (31°S), presentando una gran variedad de climas y relieves que dan origen a una amplia diversidad de ambientes; desde pastizales, esteros y sabanas –secas e inundables– hasta bañados, salitrales, sierras y ríos; y una gran extensión y diversidad de bosques y arbustales. Esta gran cantidad de ambientes distintos se traduce en una alta diversidad de especies animales y vegetales que hacen del Chaco un área donde es clave el manejo sustentable de los recursos naturales (Brassiolo, 2015; Borraz et al., 2017) y la conservación de la biodiversidad (TNC, 2005).

En las últimas décadas, el avance de la frontera agropecuaria ha sido el cambio de uso del suelo dominante en la región del Chaco, y se produjo a expensas de la deforestación de bosques nativos y el reemplazo de pastizales naturales en grandes áreas con condiciones apropiadas para el desarrollo de la ganadería vacuna y de cultivos muy demandados internacionalmente (soja, maíz y trigo) (Volante et al., 2016; Baumann et al., 2017). Este proceso de cambio en el uso de las tierras ha convertido al Chaco una de las tres regiones con mayores tasas de deforestación a nivel mundial, donde la implantación de pasturas para el ganado cumple un rol pionero para luego ser ocupado por cultivos anuales (Song et al., 2021). La expansión de la agricultura y de la ganadería intensiva en este contexto ha sido muy exitosa en incrementar la producción de alimentos y la actividad económica respecto al uso tradicional extensivo y forestal (Grau et al., 2008, Murray et al., 2016). Sin embargo, estos beneficios en muchos casos se traducen en procesos que conducen a la degradación de las tierras: fragmentación del paisaje, afectando la diversidad de aves (Macchi et al., 2013; Mastrangelo y Gavin 2014) y mamíferos (Quiroga et al., 2016; Periago et al., 2015), disminución en el almacenamiento de C en los suelos (Osinaga et al., 2017; Rojas et al., 2016) y en la biomasa (Fernández et al., 2020a), ascenso de la napa freática debido a una menor evapotranspiración de los cultivos respecto al bosque, lo que podría incrementar el riesgo de salinización de los suelos (Jobbágy et al., 2008; Giménez et al., 2015) y erosión hídrica (Brown et al., 2009) y eólica (Rojas et al., 2013) en los suelos desmontados. En este contexto, uno de los mayores desafíos que enfrenta la región del Chaco es resolver el conflicto entre la producción de alimentos y la conservación de los recursos naturales, evitando la degradación de las tierras. Las decisiones sobre el uso de los recursos naturales es una tarea inevitable que requiere contar con información que permita a la sociedad definir las opciones alternativas. Entre esta información, es clave la evaluación y el monitoreo de la degradación de las tierras ya que, sin una línea de base científicamente robusta y consistente, la identificación de prioridades y el monitoreo de los resultados de las acciones, se ven seriamente restringidos (Verstraete et al., 2011; Vogt et al., 2011).

En los últimos 20 años, la superficie de pasturas en la región chaqueña se incrementó en un 137% (de 4.3 a 10.2 millones de hectáreas), siendo actualmente el tercer tipo de cobertura del suelo más extendido, luego de los bosques y de los pastizales naturales, representando el

8.5% de la superficie total de la región (Mapbiomas, 2020). Esta expansión se produjo por la incorporación de pasturas megatérmicas de mayor productividad a los sistemas ganaderos, permitiendo alcanzar una producción de forraje entre 1500-3000 Kg MS/ha/año en el Chaco Árido (Blanco et al., 2005) y entre 6000-13000 Kg MS/ha/año en el Chaco Seco y Húmedo (Cornachione, 2018). Las pasturas megatérmicas implantadas, son gramíneas (metabolismo C4) de crecimiento estacional (150 a 210 días de ciclo primavera-estivo-otoño) y de alto potencial de producción de biomasa forrajera por unidad de superficie, mejor palatabilidad, mayor foliosidad, mejor persistencia a pastoreo y calidad nutricional que las especies nativas. La forma de implantación varía dependiendo del retorno económico según el potencial ambiental, y de las restricciones al desmonte y uso del suelo impuestas en la zonificación que establece la ley de bosques. En las zonas más secas de la región y donde la supresión del bosque es restringida, generalmente se utiliza un método rudimentario y de menor costo basado en la dispersión de semilla al voleo mediante grandes rolos con cuchillas que aplastan y trituran la vegetación leñosa logrando un desmonte y remoción del suelo parciales (llamados "rolados"). En cambio en ambientes más húmedos y donde se dispone de lotes limpios es posible optimizar la implantación mediante el arado y sembradora de precisión. Entre las especies más difundidas en la región del Chaco, se pueden mencionar *Megathyrsus maximus* cv. (Gatton panic), *Pennisetum ciliaris* (Buffel grass), *Chloris gayana* cv. Grama rhodes (Grama rhodes) y diversos materiales del género *Brachiaria*, cada una de las cuales tiene requerimientos y características adaptativas diferentes, brindando la posibilidad de implantarlas en ambientes con diferentes características edáficas y pluviométricas. La incorporación de gramíneas megatérmicas marcó un antes y un después en el crecimiento y desarrollo de la ganadería chaqueña, convirtiéndose en la base alimenticia de los sistemas de producción de carne en base a pasto (Cornacchione y Reineri, 2008; Fernández et al., 2020b) permitiendo aumentar la producción de ganado bovino hasta un 400% (Fumagalli y Kunst, 2002; Ferrando et al., 2005). Sin embargo, en estas pasturas se ha observado una disminución en la productividad a través de los años de uso, siendo la misma vinculada a procesos de degradación física y química de suelos (Roncedo et al., 2003; Padilla et al., 2009; Muñoz Iniestra et al., 2013). La degradación de las pasturas se manifiesta en la pérdida de cobertura, vigor y de productividad de las especies forrajeras deseables, la invasión de malezas o especies indeseables herbáceas, la invasión de leñosas o arbustización (especialmente en rolados o desmontes recientes), el incremento de espacios con suelo desnudo y la evidencia de procesos erosivos y compactación del suelo (Fumagalli y Kunst, 2002; Betancourt, 2006; Escalante Torres, 2015).

Varios estudios han evaluado indicadores de degradación en pasturas de la región chaqueña (ej. Tomanek 2020; Wolf Celoné, 2013; Magliano et al., 2017; Smovilla Lumbreras et al., 2019). Sin embargo, hasta el presente no existe un diagnóstico regional y espacialmente explícito del estado de degradación de las pasturas chaqueñas. Esta información es fundamental para: i) orientar el diseño de políticas públicas de gestión de los recursos naturales, ii) apoyar la toma de decisiones empresariales para el establecimiento y ajuste de prácticas mejoradas de manejo, iii) priorizar líneas de investigación para la mejora y rehabilitación de pasturas

degradadas, iv) establecer una línea de base a partir de la cual monitorear los efectos de las acciones antrópicas.

Se ha demostrado que los sensores remotos son una herramienta útil para evaluar la degradación de las tierras en grandes áreas (Cohen et al., 2003). Los índices de vegetación (VIs), obtenidos de imágenes satelitales, son transformaciones matemáticas de medidas de reflectancia en diferentes bandas espectrales, especialmente las bandas del visible (generalmente rojo) e infrarrojo cercano, y son ampliamente utilizados para obtener información sobre las características de la superficie terrestre (Jackson y Huete, 1991). Con los años, se han propuesto un gran número de VIs de diversa complejidad, cada uno con sus ventajas y limitaciones (Bannari et al., 1995). El VI más comúnmente utilizado es el Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI en inglés, Rouse et al., 1973), el cual se correlaciona con la biomasa, cobertura y la producción primaria neta aérea de la vegetación (Tucker et al., 1985; Prince 1991; Myneni et al., 1995; Gaitán et al., 2013). Este índice es un indicador ampliamente utilizado para evaluar el estado de degradación de las tierras (Pettoirelli et al., 2005); específicamente, las tendencias temporales de NDVI se han utilizado para identificar áreas con tendencias negativas o positivas, generalmente interpretadas como una degradación o mejora en el estado de salud de los ecosistemas, respectivamente (ej. Bai et al., 2008). Basado en el NDVI, Gao et al. (2006) desarrollaron el índice CVP (Cobertura Vegetal de las Pasturas) para evaluar la degradación de los pastizales naturales en la región del Tibet (China). Posteriormente, el CVP fue adaptado para la evaluación de pasturas en Brasil (Andrade et al., 2010; Ferreira y Neto, 2018). Para su cálculo se analiza el NDVI de cada píxel en relación a los valores máximos y mínimos dentro de áreas homogéneas. Muchos otros índices y métodos de análisis han sido propuestos para evaluar la degradación de las tierras, a pesar de estos avances, los diferentes índices y aproximaciones de análisis conducen a respuestas contradictorias respecto a qué áreas se están degradando o mejorando (Hein y de Ridder 2006; Prince et al., 2007; Bai et al., 2008; Hellden y Tottrup, 2008; Wessels, 2009; de Jong et al., 2011). Probablemente, parte de esta controversia se deba a la relación incierta entre los datos de radiancia espectral medidos por sensores remotos y las variables de estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Los relevamientos de indicadores a campo son, por lo tanto, esenciales para la interpretación de las observaciones satelitales al proporcionar datos para validar los índices y calibrar modelos empíricos que relacionan la estructura y funcionalidad del ecosistema con los datos de los sensores remotos (Wessman, 1994).

Los objetivos de este estudio fueron: i) caracterizar el estado de degradación de las pasturas chaqueñas mediante indicadores medidos a campo; ii) validar el desempeño de índices satelitales como *proxys* del estado de degradación de las pasturas mediante el análisis de su relación con los indicadores evaluados a campo; iii) utilizar el índice con mejor desempeño para cartografiar el estado de degradación de las pasturas chaqueñas.

Metodología

Área de estudio

El Gran Chaco Americano es una vasta región de planicies con características fitogeográficas propias del centro sur del continente Sudamericano. Es el tercer gran territorio biogeográfico y morfoestructural de América Latina después del Amazonas y el Sistema Sabánico Sudamericano. Comprende una superficie de 120.6 millones de hectáreas y cubre porciones de cuatro países: Argentina (62%), Paraguay (25%), Bolivia (12%) y Brasil (1%). Se extiende desde latitudes tropicales (18°S) hasta ambientes subtropicales (31°S), esta división ecológica presenta una gran variedad de climas y relieves que dan origen a una amplia diversidad de ambientes; desde pastizales, esteros y sabanas secas e inundables, hasta bañados, salitres, sierras y ríos; y una gran extensión y diversidad de bosques y arbustales (TNC, 2005). Engloba tres subregiones: Chaco Húmedo, Chaco Seco y Chaco Árido (Figura 1).

Mapa de pasturas

Para el cálculo de los índices satelitales utilizados como indicadores del estado de degradación de las pasturas se requiere un mapa de pasturas, en donde se puedan identificar y separar las pasturas de otras coberturas del suelo. Inicialmente, se utilizó como máscara la clase pasturas del mapa Mapbiomas Chaco, colección 1 (2018). A partir del análisis de los resultados preliminares se detectaron inconsistencias en algunas áreas.

Con el objetivo de mejorar el mapa de pasturas se realizó una clasificación supervisada de imágenes satelitales. Para entrenar al algoritmo de clasificación (Random Forest) se utilizaron puntos con tipos de cobertura del suelo conocida, los cuales fueron definidos por técnicos del INTA de acuerdo con su conocimiento del terreno. Para clasificar se utilizó un mosaico conformado por un “stack” o “aplicado” de bandas espectrales (“stack clasificación”) el cual se conformó a partir de la combinación de dos “stacks” independientes: “stack mapbiomas” y “stack Landsat-Modis”.

Stack Mapbiomas: corresponde a un mosaico de imágenes satelitales Landsat del año 2019 generado a partir de imágenes con datos de reflectancia superficial corregidos atmosféricamente (Tier 1) en el marco del proyecto Mapbiomas Chaco (ver detalles: <https://chaco.mapbiomas.org/atbd>). Se aplicó la máscara CF (Foga et al., 2017) para seleccionar píxeles en escenas con menos del 50% de cobertura de nubes. Se generó un “stack” de todas las Bandas espectrales de resolución de 30 m, y considerando el año calendario (es decir, de enero a diciembre de 2019). El “stack Mapbiomas” contó con un total de 63 bandas, incluyendo las bandas originales y diferentes índices, fracciones, pendientes y valores acumulados como *proxys* de diferentes características del comportamiento espectral y que, a su vez, se relacionan con la estructura de la vegetación. Para cada uno de estos índices se calcularon métricas de tendencia central (mediana) y de la variabilidad (rango, desviación estándar y coeficiente de

variación) para el período anual. Algunas variables (por ejemplo, fracciones) se obtuvieron a partir de métodos de “desmezclado espectral” (Souza et al., 2005), otras involucraron operaciones aritméticas con diferentes bandas espectrales (p. ej. índices) o se calcularon a partir de modelos lineales ajustados a la relación entre un determinado índice (GCVI, NDVI y NDFI) y el tiempo (por ejemplo, pendiente) o como la suma de cada valor de índice a lo largo del período anual.

Stack Landsat-Modis: corresponde a un mosaico de 92 bandas con una resolución espacial de 30 metros que resulta de la fusión de imágenes Landsat y Modis (algoritmo ESTARFM, Knauer et al., 2016) del período julio 2019 a julio 2020. Las 92 bandas resultan de 23 fechas (cada 16 días) por 4 bandas espectrales (B1=azul, B3=rojo, B4=NIR y B7=MIR).

Índices Satelitales

Para el cálculo de los índices satelitales utilizados como *proxys* del estado de degradación de las pasturas se utilizaron imágenes satelitales del producto LANDSAT/LC08/C02/T1_L2. Este producto contiene datos de reflectancia de la superficie, corregida atmosféricamente y de temperatura de la superficie terrestre, derivada de los datos producidos por los sensores Landsat 8 OLI / TIRS. Esta colección fue recortada por la máscara de pasturas y se calculó la mediana del NDVI del periodo 1 de julio de 2019 al 30 de junio de 2021, filtrando los píxeles con nubes o sombras (banda QA_pixel ≠0). El índice CVP de cada píxel se calculó como:

$$\text{CVP} = (\text{NDVI} - \text{NDVI1}) / (\text{NDVI99} - \text{NDVI1}) * 100$$

Donde NDVI es la mediana, NDVI1 y NDVI99, son los percentiles 1 y 99 de los valores de NDVI de las pasturas dentro de una región. Para ello, se utilizó la zonificación del Chaco en tres subregiones: Chaco Árido, Chaco Seco y Chaco Húmedo (Figura 1). Todos los cálculos fueron realizados en la plataforma Google Earth Engine.

Muestreo de campo

Se relevaron 214 sitios en el Chaco argentino (Figura 1). En cada sitio se realizó un registro fotográfico del punto de muestreo y se registró información sobre datos productivos (historia del lote y manejo de la pastura), atributos de la vegetación (especies, presencia de malezas, cobertura aérea y basal, presencia de leñosas), e indicadores de erosión del suelo. También se tomaron muestras de suelo para análisis en laboratorio (carbono orgánico (Walkley y Black, 1934), pH (1:2,5), conductividad eléctrica (Rhoades, 1996) y Nitrógeno (Bremner, 1996)) y determinación de la densidad aparente. Para más detalle, en el Anexo I se presenta el protocolo de muestreo de campo.

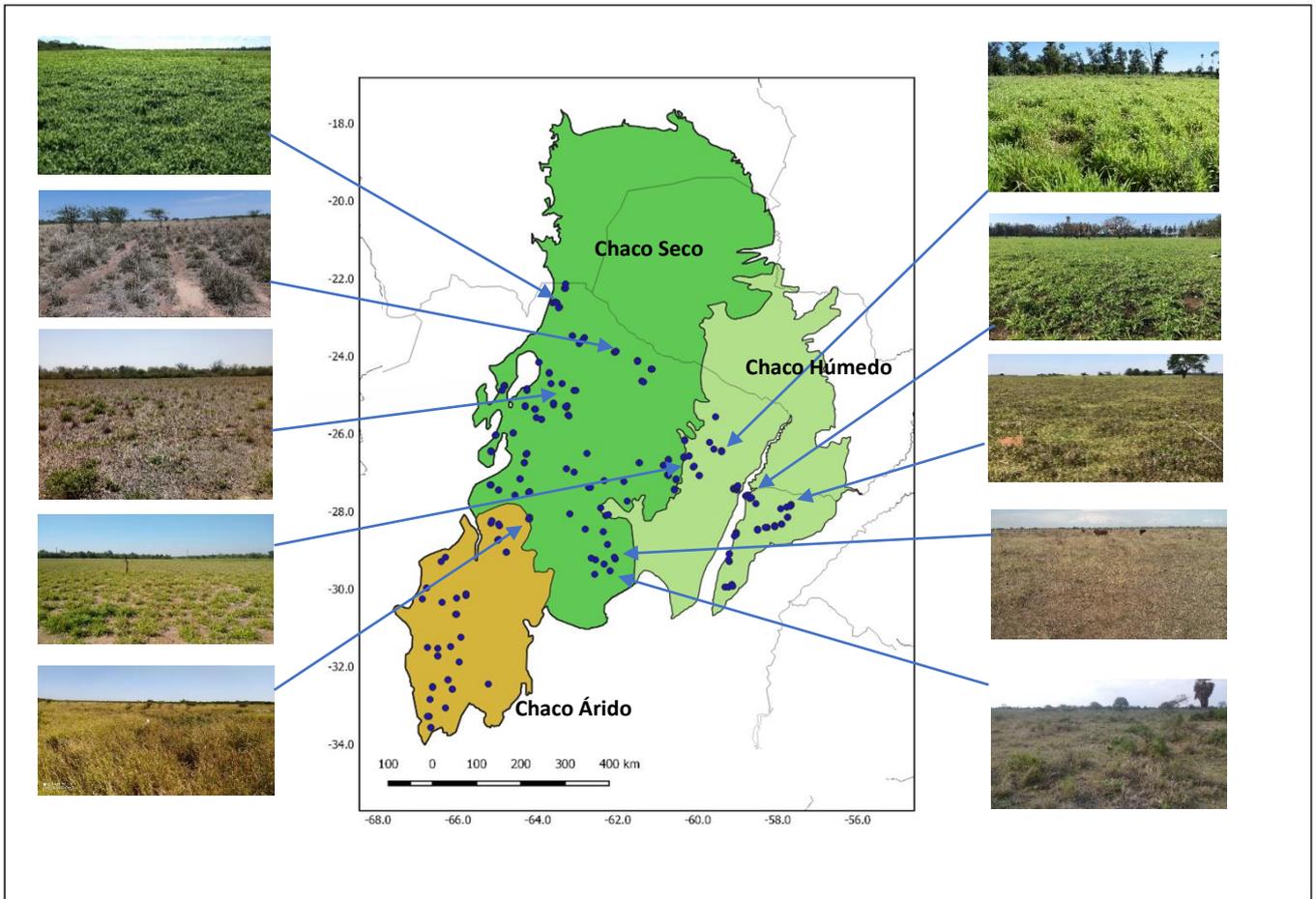


Figura 1. Ubicación de los 214 sitios de pasturas relevados para la validación del mapa de degradación de pasturas.

Resultados

Mapa de pasturas

La superficie de pasturas en la región del Gran Chaco Americano fue de 10.160.000 hectáreas, un 0.4% menos respecto de las 10.203.000 hectáreas cartografiadas en la Colección 2 de Mapbiomas (Mapbiomas, 2020). De las 10.16 millones de hectáreas de pasturas, el 38.0% se encuentran en Argentina (3.86 millones de hectáreas), el 57.3% en Paraguay (5.82 millones de hectáreas) y el 4.7% en Bolivia (0.48 millones de hectáreas) (Figura 2). Por subregiones, el 78.4% (7.96 millones de hectáreas) se encuentran en el Chaco Seco, el 11.5% (1.17 millones de hectáreas) en el Chaco Húmedo y el 10.1% (1.03 millones de hectáreas) en el Chaco Árido (Figura 2).

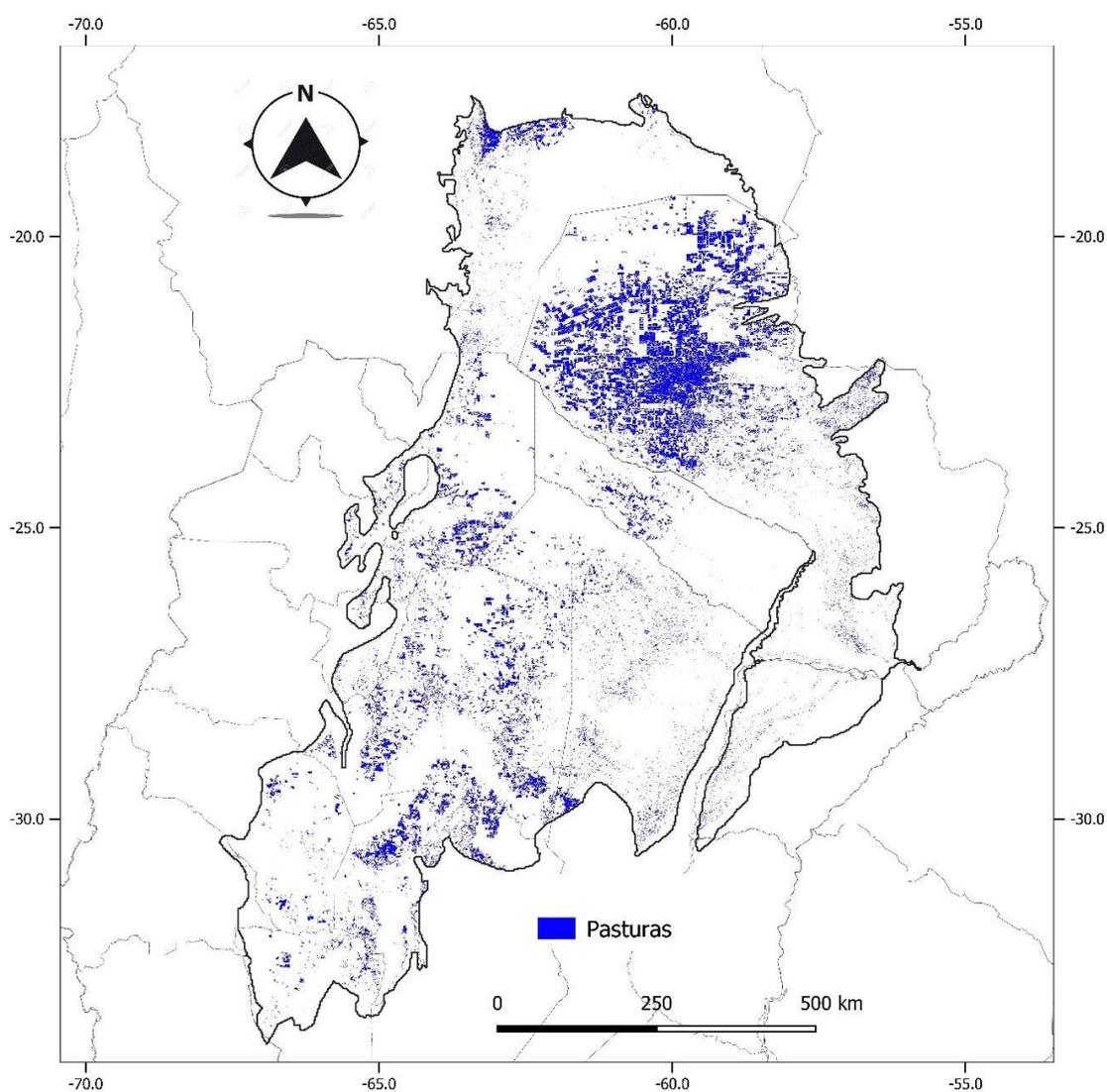


Figura 2. Área de pasturas en la región del Gran Chaco Americano.

Caracterización de las pasturas por especie forrajera dominante

De los 214 sitios de pasturas relevados en el Chaco argentino, el 53% se ubicaron en el Chaco seco, el 23% en el Chaco húmedo y 18% en el Chaco árido. Cuatro especies forrajeras dominan en el 80% las pasturas muestreadas: *Megathyrsus maximus* cv. (Gatton panic) y *Chloris gayana* cv. Grama rhodes (Grama rhodes) se encontraron aproximadamente en el 30% y 10% de los sitios, principalmente en el Chaco seco. Mientras que *Brachiaria* sp. y *Pennisetum ciliaris* (Buffel grass) dominaron en ambos casos en el 17% de los sitios, en el Chaco húmedo y árido, respectivamente. Sumado a esto, en el 6.5% de los sitios Gatton panic se encontró asociado con Buffel grass o con Grama rhodes, principalmente en el Chaco seco (Figura 3, Tabla 1).

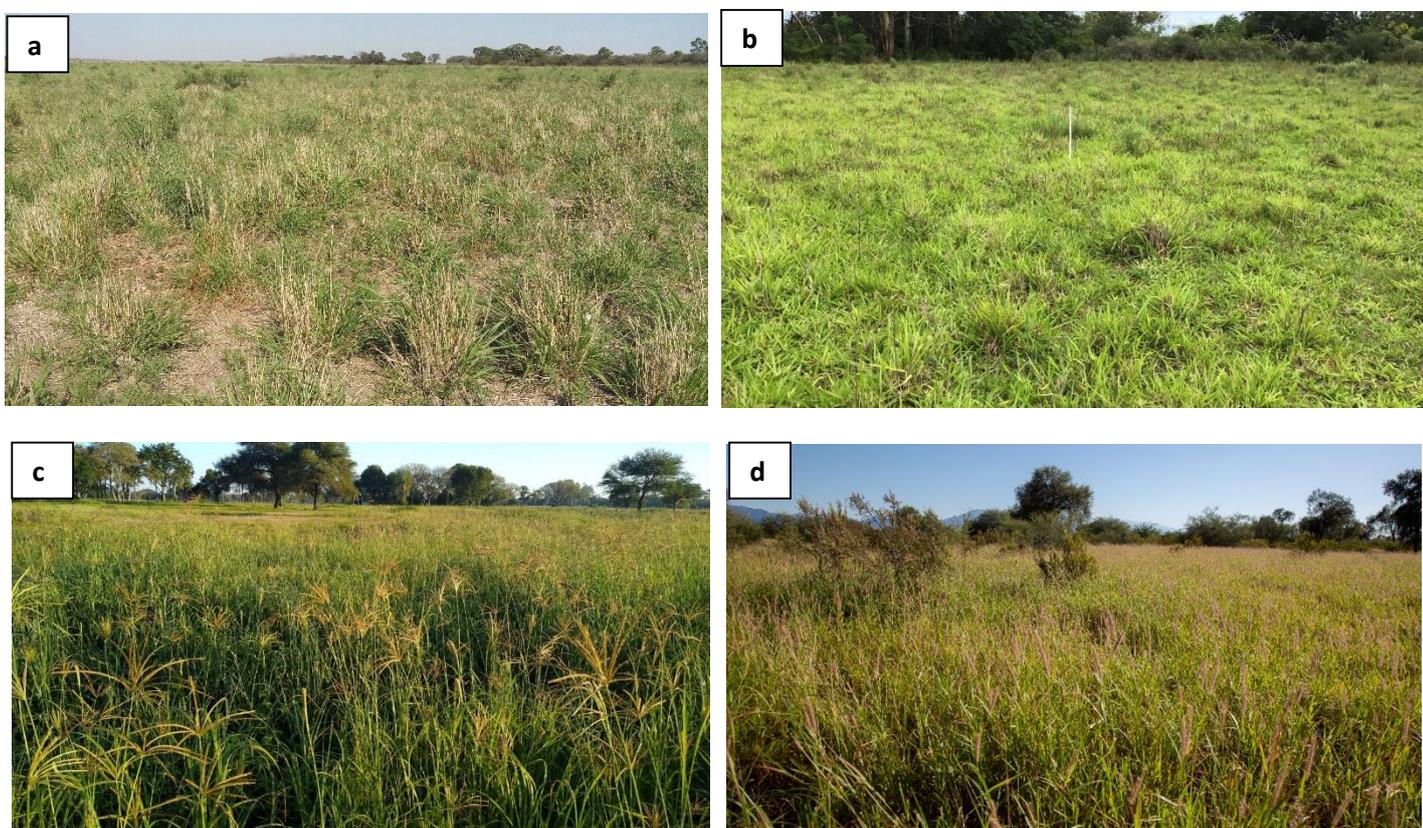


Figura 3. Pasturas de Gatton panic (a), *Brachiaria* sp. (b), Grama rhodes (c) y Buffel grass (d) en la región chaqueña argentina.

Tabla 1. Número de sitios de pasturas muestreados en el Chaco argentino, discriminados por subregión y especie forrajera implantada dominante.

Especie	Chaco Húmedo	Chaco Seco	Chaco Árido	Total	%
Brachiaria sp.	35	2		37	17.3
Setaria sphacelata	8			8	3.7
Gramma rhodes	6	17		23	10.7
Gatton panic - Gramma rhodes	1	5		6	2.8
Gatton panic	4	58		62	29.0
Gatton panic - Buffel grass		8		8	3.7
Panicum coloratum		3	2	5	2.3
Buffel grass		6	30	36	16.8
Otras especies	8	4		12	5.6
Sin dato	1	10	6	17	7.9
Total	63	113	38	214	
%	29.4	52.8	17.8		

Respecto al clima, estas especies forrajeras dominantes se distribuyen siguiendo un gradiente de humedad: en el extremo más húmedo las especies del género *Brachiaria* (1100 mm de precipitación media anual), en condiciones intermedias a Gramma rhodes (850 mm) y luego Gatton panic (530 mm), y finalmente Buffel grass como la especie más adaptada a condiciones de aridez (300 mm). En relación a la temperatura, Buffel grass es también la especie presente en condiciones más frías (20.6 °C de temperatura media anual) y Gatton panic en los más calurosos, tanto solo como asociado a Gramma rhodes (22.5 - 23.2 °C, respectivamente) (Tabla 2, Figura 4).

Tabla 2. Precipitación media anual (PMA), índice de aridez y temperatura media anual (TMA) de los sitios muestreados, discriminados por especie forrajera dominante. Medias del período 1958-2020. Fuente: Terraclimate (Abatzoglou et al., 2018).

Especie	PMA (mm)	Índice de Aridez	TMA (°C)
Brachiaria sp.	1066	0.75	21.3
Setaria sphacelata	979	0.71	20.5
Gramma rhodes	831	0.56	21.8
Gatton panic – Gramma rhodes	638	0.39	23.2
Gatton panic	529	0.34	22.5
Gatton panic -Buffel grass	423	0.28	22.0
Panicum coloratum	533	0.33	20.7
Buffel grass	300	0.18	20.6
Otras especies	850	0.57	22.0
Sin dato	550	0.36	21.7

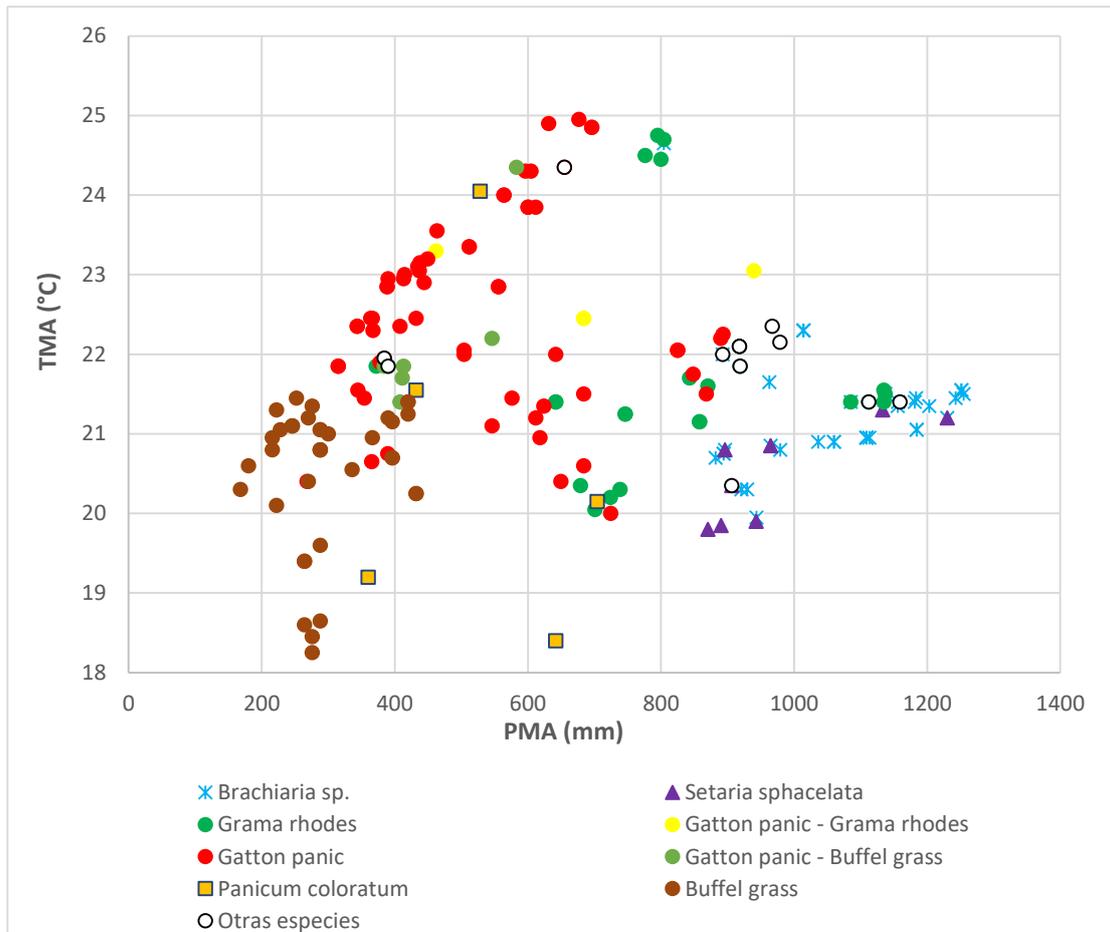


Figura 4. Precipitación (PMA) y temperatura (TMA) en los 214 sitios relevados, agrupados por la especie forrajera implantada.

En las zonas más húmedas, las pasturas de *Brachiaria*, *Setaria sphacelata* y *Grama rhodes* son, en orden decreciente, las que presentan mayor cobertura basal de especies forrajeras y menor suelo desnudo (>35% y <10%, respectivamente), y en todas ellas prácticamente sin invasión de leñosas. También en estas condiciones más favorables las pasturas tuvieron más malezas (hasta 25%), excepto en aquellas con presencia de *Grama rhodes* que fueron las menos invadidas de todas (<10%). En el extremo más árido, las pasturas con *Buffel grass* y *Gatton panic* muestran menor cobertura de forrajeras, más suelo desnudo y mayor invasión de leñosas (<25%, >15% y hasta 17%, respectivamente) (Tabla 3).

Tabla 3. Cobertura basal de la/s especie/s forrajeras, leñosas, malezas y suelos desnudo en los sitios muestreados, discriminados por especie forrajera dominante.

Especie	Cob. Basal sp. Forrajera (%)	Cob. Leñosas (%)	Cob. Malezas (%)	Suelo desnudo (%)
Brachiaria sp.	63.2	0.1	14.2	10.6
Setaria sphacelata	55.3	0.0	26.0	7.4
Gramma rhodes	36.6	0.3	9.6	3.8
Gatton panic – Gramma rhodes	35.7	0.5	2.8	7.0
Gatton panic	25.7	6.1	12.8	14.7
Gatton panic -Buffel grass	17.3	4.8	10.9	16.3
Panicum coloratum	30.8	2.8	6.6	19.4
Buffel grass	21.0	16.7	14.6	15.9
Otras	65.5	0.9	13.0	7.6
Sin dato	35.7	7.3	8.6	8.1

En cuanto a las características edáficas, las pasturas de Gatton panic y Gramma rhodes se encuentran en los mejores suelos: con mayor contenido de C (media de 60 Mg C/ha en 0-30 cm), más ricos en N y con pH cercanos a la neutralidad, aunque leve a moderadamente salinos. En cambio, las pasturas de *Brachiaria* y Buffel grass se encuentran en suelos con menos de la mitad de contenido de C (media de 25 Mg C/ha), pero diferenciadas en que *Brachiaria* se distribuyó principalmente en suelos levemente a moderadamente ácidos y no salinos, mientras que Buffel grass se encuentra en suelos más alcalinos y levemente salinos (Tabla 4).

Tabla 4. Stock de C (0-30 cm), pH, N, densidad aparente (Dap) y conductividad eléctrica (CE) (0-10 cm) del suelo de los sitios muestreados, discriminados por especie forrajera dominante.

Especie	Stock C 0-30 cm (MgC/ha)	pH (0-10 cm)	N (%) (0-10 cm)	Dap (gr/cm ³) (0-10cm)	CE (dS/m) (0-10 cm)
Brachiaria	27.5	5.90	0.07	1.52	0.53
Setaria sphacelata	28.4	5.54	0.08	1.60	0.36
Gramma rhodes	58.7	6.87	0.17	1.35	2.24
Gatton panic – Gramma rhodes	60.0	7.24	0.19	1.40	0.99
Gatton panic	58.5	7.13	0.21	1.36	1.52
Gatton panic - Buffel grass	38.5	7.83	0.15	1.27	0.43
Panicum coloratum	50.2	6.81	0.13	1.37	0.47
Buffel grass	23.6	7.80	0.07	1.45	1.19
Otras	56.2	6.30	0.18	1.38	0.34
Sin dato	50.3	6.90	0.24	1.20	0.49

Índices NDVI y CVP como *proxys* de la degradación de las pasturas

Ambos índices satelitales mostraron asociaciones significativas con la mayoría de las variables de suelo y vegetación, mientras que no mostraron relación con la conductividad eléctrica del suelo, la cobertura de malezas y la densidad aparente en el caso del CVP. Tanto el NDVI como el CVP se relacionaron positivamente con la cobertura basal de las especies forrajeras y el contenido de carbono orgánico y nitrógeno del suelo, mientras que mostraron relaciones negativas con el pH y la cobertura de leñosas y suelo desnudo (Tabla 5).

Tabla 5. Coeficiente de correlación de Pearson entre los índices CVP y NDVI y los indicadores medidos a campo: cobertura basal de las especies forrajeras, cobertura de leñosas, malezas, suelo desnudo, densidad aparente, pH, conductividad eléctrica, nitrógeno y carbono orgánico del suelo (SOC) (0-30 cm). Los asteriscos indican la significancia estadística: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

Variable	CVP	NDVI
Cob. Basal	0.4***	0.46***
Cob. Malezas	-0.03	-0.0045
Cob. Leñosas	-0.28***	-0.38***
Suelo Desnudo	-0.28***	-0.25***
Densidad aparente	0.14	0.18**
pH	-0.54***	-0.65***
Cond. eléctrica	-0.05	-0.1
Nitrógeno	0.21**	0.23**
SOC	0.32***	0.36***

Con las variables de suelo y vegetación se realizó un Análisis de Componentes Principales que permitió ordenar los sitios en los ejes que explican la mayor variación de los datos (CP1 y CP2). El CP1 se asoció negativamente con la cobertura basal de forrajeras y el contenido de C y N del suelo y positivamente con la cobertura de leñosas, pH, suelo desnudo y malezas (Tabla 6). Este eje puede interpretarse como un eje inversamente relacionado con el estado productivo de las pasturas, ubicando las pasturas más productivas (o en mejor estado o condición) con valores negativos y las pasturas menos productivas (o peor estado o condición) con valores positivos (Figura 5).

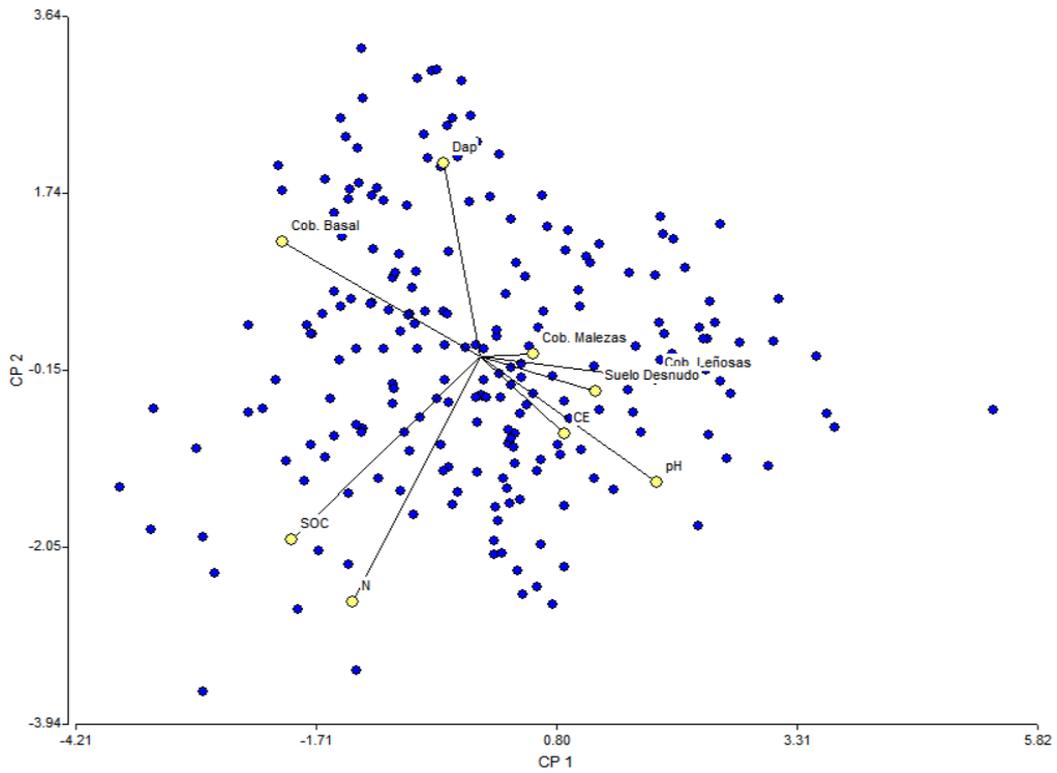


Figura 5. Ubicación de los sitios de pasturas en los primeros dos ejes del Análisis de Componentes Principales.

Tabla 6. Autovectores, autovalores y varianza explicada por los primeros dos ejes del Análisis de Componentes Principales.

Variables	CP1	CP2
Cob. Basal	-0.47	0.28
Densidad aparente	-0.08	0.47
pH	0.42	-0.31
Cond. eléctrica	0.20	-0.19
Nitrógeno	-0.30	-0.60
SOC	-0.45	-0.45
Cob. Malezas	0.13	0.01
Cob. Leñosas	0.42	-0.06
Suelo Desnudo	0.27	-0.09
Autovalor	2.31	1.99
Varianza (%)	26.0	22.0

Los índices NDVI y CVP se relacionaron negativamente con el CP1 confirmando que ambos índices son buenos *proxys* del estado o condición de las pasturas (Figura 6). Sin embargo, ambos índices también mostraron una relación positiva y estrecha con la precipitación media anual (PMA), indicando que el NDVI y el CVP reflejan el estado de las pasturas asociado al gradiente de precipitaciones de la región (Figura 7).

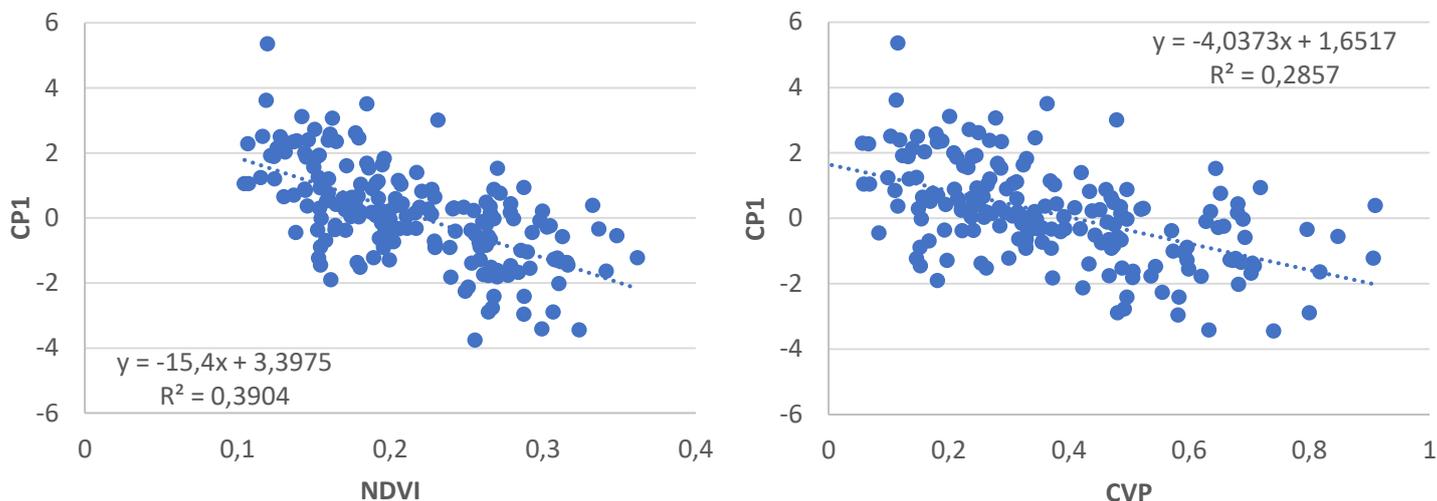


Figura 6. Relación entre el NDVI (a) y el CVP (b) con el CP1 del Análisis de Componentes Principales.

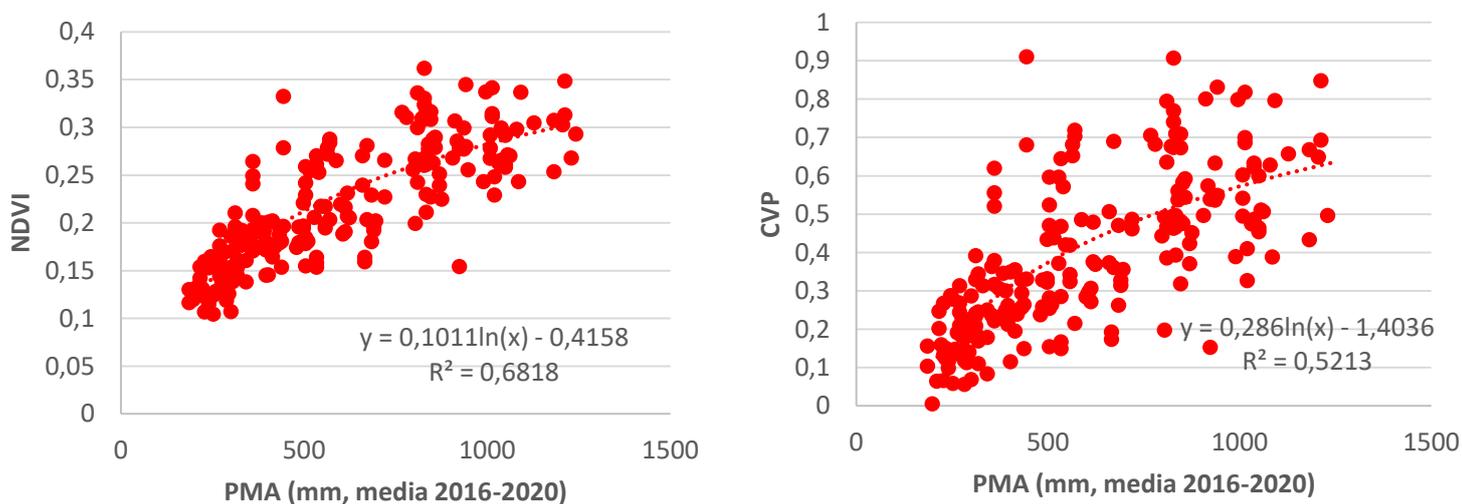


Figura 7. Relación entre la precipitación media anual (PMA) del período 2016-2020 (Fuente: Terraclimate, Abatzoglou et al., 2018) con el NDVI (a) y el CVP (b).

Los índices NDVI y CVP representan más bien el estado de las pasturas asociado al gradiente ambiental de la región, por lo tanto, valores bajos indican pasturas de baja productividad en las zonas más secas y valores altos indican pasturas de alta productividad en las zonas más húmedas. Dado que esto no responde directamente al objetivo de este estudio, que es mapear el estado de degradación o pérdida de potencial productivo, se puso a prueba el desarrollo de un índice que permita cartografiar la degradación en una región con un marcado gradiente de potencial productivo asociado a las precipitaciones. En este contexto, definimos la degradación como una pérdida de “condición” o “estado de salud” en relación a un potencial dado por la PMA del sitio.

El cálculo de este índice, al que denominamos Índice de Degradación de las Pasturas (IDP) se basa en los residuales de la relación PMA-NDVI a nivel de pixel. Este índice permite analizar las variaciones del NDVI normalizando el efecto de las precipitaciones. De esta manera, residuales negativos estarían relacionados con una pérdida de “condición” o “estado de salud” en relación al potencial medio dado por las precipitaciones. Mientras que residuales positivos indicarían pasturas en buena condición.

Para poner a prueba el desempeño del IDP como *proxy* de degradación de las pasturas calculamos este índice para los 214 sitios relevados a campo. Dado que la relación PMA-NDVI en estos sitios no es lineal (Figura 7) se realizó un análisis de regresión por segmentos en R (paquete segmented). En este tipo de análisis la variable independiente -i.e. la PMA- se particiona en intervalos de valores para los cuales la pendiente de la relación entre la PMA y el NDVI es diferente (entendido como valores de pendientes que se encuentran por fuera de los intervalos de confianza). Como resultado de este análisis se determinaron dos puntos de quiebre: 360 y 830 mm. De esta manera se establecieron tres subregiones: <360 mm, 360-830 mm y >830 mm. Para cada sitio se calculó el IDP como el residual de la regresión lineal PMA-NDVI en cada subregión (NDVI medio del período 2019-2021 menos el NDVI predicho). Con el mismo objetivo de normalizar los datos de las variables de suelo y vegetación, se calcularon los residuales de las relaciones entre estas variables y la PMA.

Si bien la asociación entre el IDP y los indicadores de campo no es estrecha, se observa una tendencia significativa de mayor cobertura de forrajeras y menor pH, densidad aparente, cobertura de malezas y suelo desnudo que las predichas por los modelos empíricos de precipitación a medida que se incrementa el IDP (Tabla 7).

Tabla 7. Coeficiente de correlación de Pearson entre el IDP y los residuales de la relación entre la PMA y la cobertura basal de forrajeras, malezas, leñosas y suelo desnudo y el pH, conductividad eléctrica, densidad aparente y contenido de N y C del suelo. * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

Residuales	IDP
Cob. Basal Forrajeras	0.27***
SOC	0.02
pH	-0.28***
Suelo Desnudo	-0.16*
Cob. Malezas	-0.14*
Densidad aparente	-0.18**
Cob. Leñosas	0.03
Conductividad eléctrica	0.02
Nitrógeno	0.04

Los sitios de muestreo fueron agrupados en tres clases de degradación de acuerdo a la siguiente clasificación basada en el IDP (Tabla 8).

Tabla 8. Clasificación del estado de degradación de acuerdo con el Índice de Degradación de Pasturas (IDP) calculado a partir de los residuales de la relación entre la precipitación media anual (PMA) y el NDVI.

IPD	Descripción	Residuales (PMA vs NDVI)
1	Pasturas con Degradación alta	< -0.015
2	Pasturas con Degradación baja	-0.015 – 0.015
3	Pasturas no Degradadas	> 0.015

En promedio, las pasturas con alta degradación tuvieron una cobertura basal de forrajeras un 13.5% y 15% menor que las pasturas con degradación baja y no degradadas, respectivamente (Figura 8). Las pasturas no degradadas tuvieron en promedio 0.2 y 0.4 unidades de pH menos que las pasturas con degradación baja y alta, respectivamente (Figura 9). Las pasturas con baja degradación presentaron alrededor de un 7% más suelo desnudo respecto a las pasturas no degradadas (Figura 10). También se observó una tendencia hacia una mayor incidencia de la erosión hídrica y eólica del suelo en las pasturas más degradadas (Figura 11).

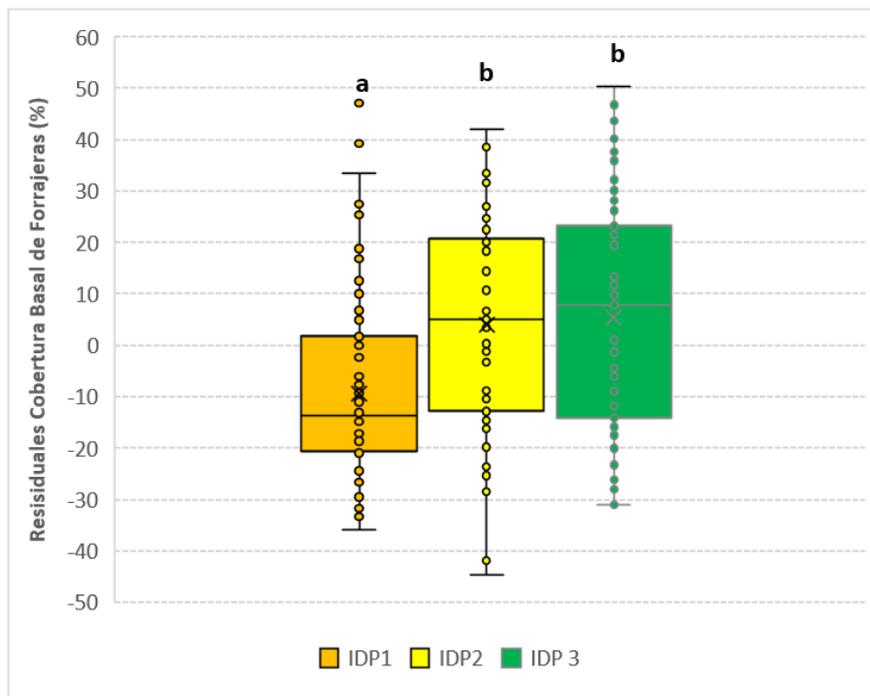


Figura 8. Diferencia en cobertura basal de forrajeras (respecto a la predicha por el modelo de precipitación) en los sitios de muestreo agrupados en las tres clases de degradación definidas por el IDP. Letras diferentes entre clases indican diferencias significativas.

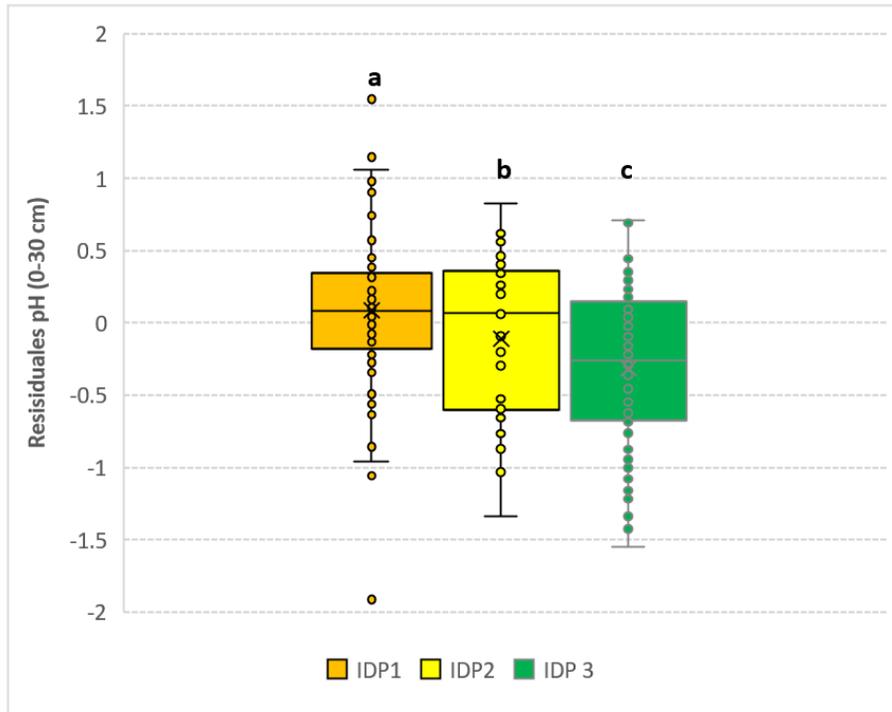


Figura 9. Diferencia en pH del suelo (respecto al predicho por el modelo de precipitación) en los sitios de muestreo agrupados en las tres clases de degradación definidas por el IDP. Letras diferentes entre clases indican diferencias significativas.

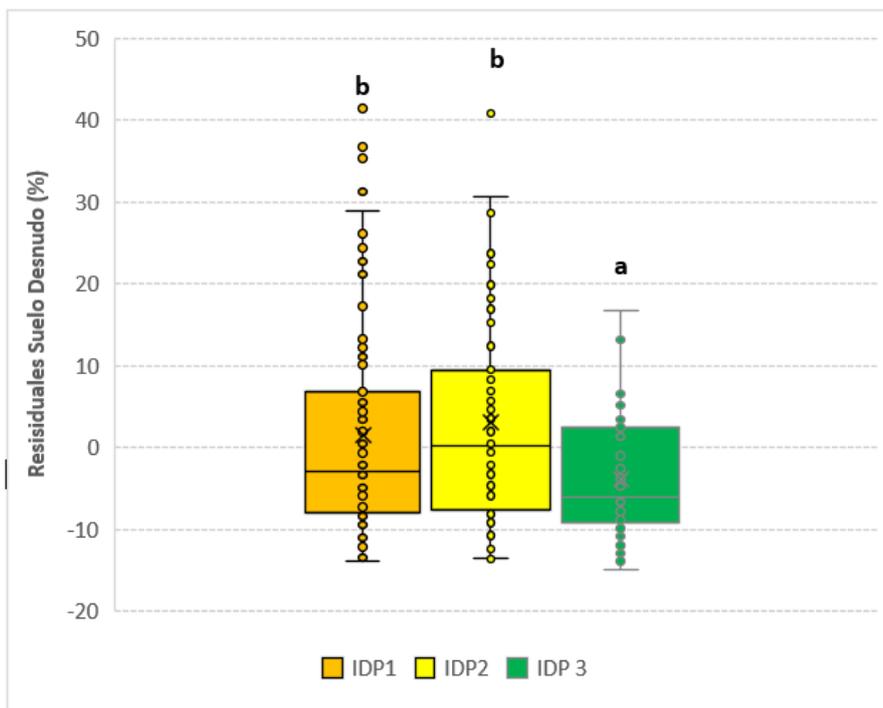


Figura 10. Diferencia en cobertura de suelo desnudo (respecto a la predicha por el modelo de precipitación) en los sitios de muestreo agrupados en las tres clases de degradación definidas por el IDP. Letras diferentes entre clases indican diferencias significativas.

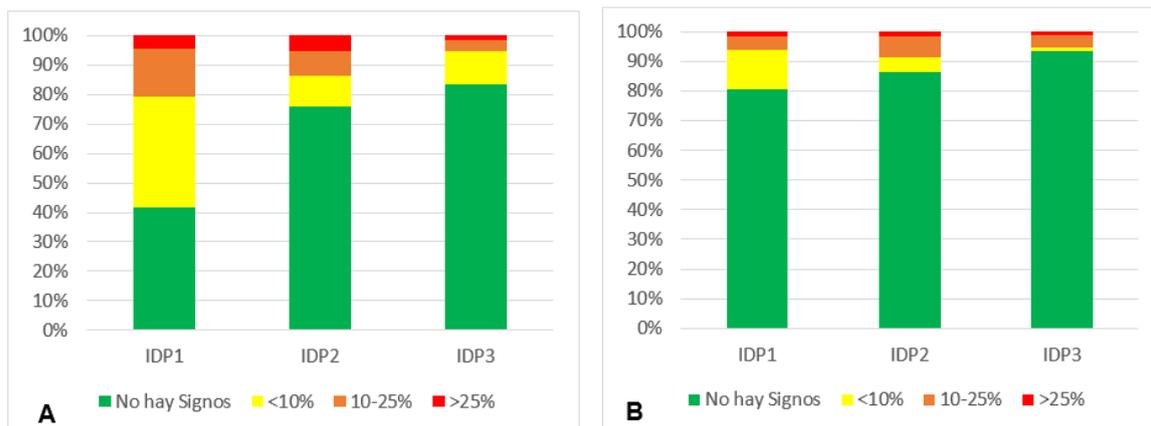


Figura 11. Proporción de los sitios de muestreo de acuerdo a la superficie afectada por erosión hídrica (a) y eólica (b) en las tres clases de degradación definidas por el IDP.

Estas evidencias sugieren que el IDP es un buen *proxy* del estado de degradación de las pasturas chaqueñas. Por lo tanto, se utilizó este índice para calcular y cartografiar el estado de degradación de las pasturas de la región (Figura 12). De acuerdo con este análisis, un 39% (3.95 millones de hectáreas) presentan alta degradación, un 30% degradación baja (3.1 millones de hectáreas) y un 31% de las pasturas se encuentran no degradadas (3.15 millones de hectáreas) (Figura 13).

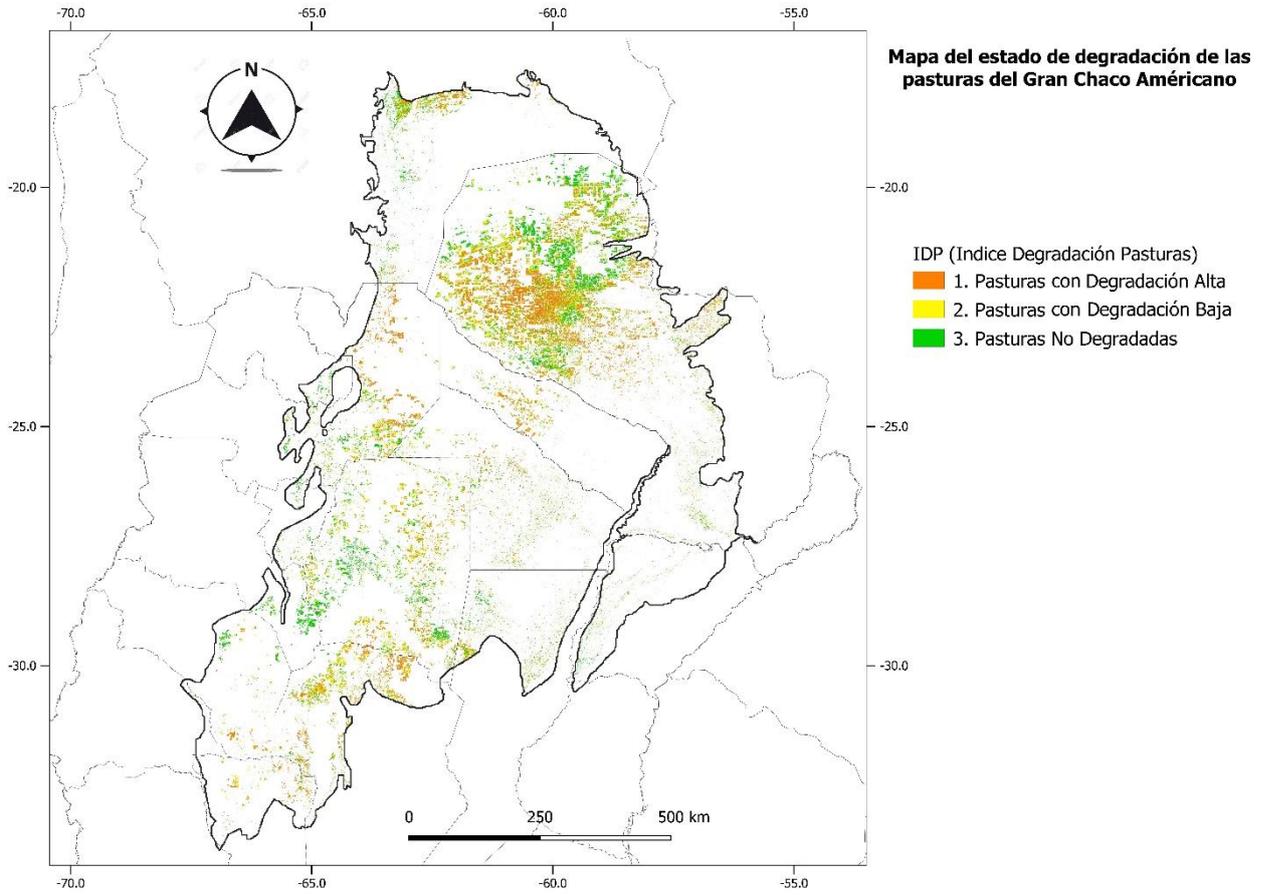


Figura 12. Mapa de degradación de las pasturas de la región chaqueña obtenido a partir del Índice de Degradación de Pasturas (IDP).

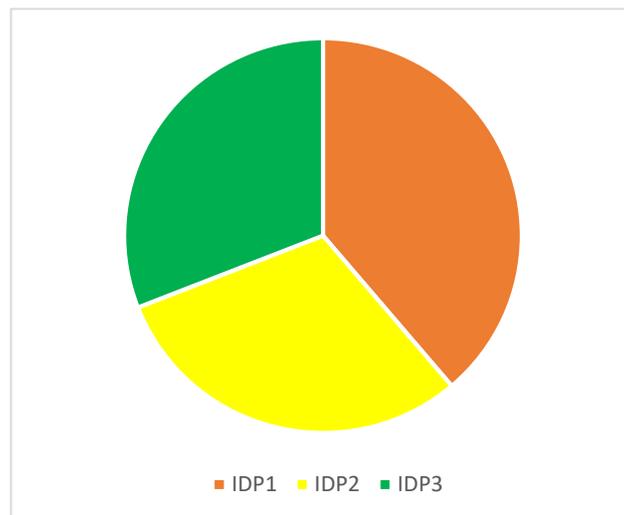


Figura 13. Proporción de pasturas de la región chaqueña de acuerdo con su estado de degradación.

Próximas líneas de investigación y consideraciones finales

En este estudio se pusieron a prueba diferentes aproximaciones basadas en índices satelitales para estimar y cartografiar el estado de degradación de las pasturas del Gran Chaco Americano y se analizó su relación con indicadores de suelo y vegetación medidos en 214 sitios del Chaco argentino.

Los índices NDVI y CVP mostraron relación con la capacidad productiva de las pasturas, que en el análisis regional está altamente correlacionado con el gradiente de precipitaciones (200 a 1200 milímetros anuales). El Índice de Degradación de Pasturas (IDP), al normalizar el efecto de las precipitaciones, permitió diferenciar tres estados de degradación que mostraron relación con los indicadores de suelo y vegetación.

Es importante señalar que, si bien las evidencias sugieren que el IDP está relacionado con la degradación, otros factores que operan a escala local (por ejemplo, el tipo de suelo o la topografía) pueden provocar desvíos en el potencial productivo de las pasturas dado por la precipitación. En este sentido, se propone en una próxima etapa explorar la inclusión de covariables (por ejemplo, textura y pendiente) que permitan cartografiar con mayor precisión la degradación.

Otro aspecto que merece destacarse es que no se realizaron muestreos de campo en Paraguay y Bolivia, de manera que la interpretación y el uso del mapa en estos países debe realizarse con precaución. Se sugiere, por lo tanto, realizar relevamientos en dichos países para validar el mapa con información local.

Hallamos que las precipitaciones ejercen un control importante sobre el potencial productivo de las pasturas de la región. Por lo tanto, para una mejor interpretación de las causas que han llevado a la degradación se propone utilizar la metodología de “restrend” como aproximación para separar los efectos del uso antrópico y de la variabilidad climática sobre el estado de salud de las pasturas (Evans y Geerken, 2004; Herrmann *et al.*, 2005; Wessels *et al.*, 2007). La metodología “restrend” establece, a nivel de cada píxel de las imágenes satelitales, la relación temporal PMA-NDVI y luego se analiza la tendencia temporal de los residuales de dicha relación. Recientes desarrollos de esta metodología han incluido a la temperatura entre las covariables del NDVI (además de la precipitación anual) y a la detección de cambios en series temporales (BFAST Verbesselt *et al.*, 2010) en implementaciones disponibles en R (paquete TSS.RESTREND, Burrell *et al.*, 2017). A su vez, disponer de la valiosa base de datos generada en este proyecto permite utilizar algoritmos de aprendizaje máquina y aprendizaje profundo (e.g. regresión de random forest, gradient boosting regression, redes convolucionales y redes recurrentes -e.g. LSTM-) para la estimación de la degradación de pasturas en la región chaqueña. Estos algoritmos representan un avance en comparación con las metodologías probadas en este proyecto ya que pueden contemplar un número mucho mayor de estimadores (variables independientes) sin asumir la relación entre las variables y en el caso de las redes explotar el patrón espacial de los estimadores.

También proponemos en estudios futuros evaluar la capacidad del IDP para predecir cambios temporales en el estado de degradación. Para ello se realizará un remuestreo de los sitios evaluados en este estudio a los 2-3 años de la primera medición. Esto permitirá analizar los cambios observados en los indicadores de degradación evaluados a campo. Con estos datos se podrá analizar la capacidad del índice IDP para monitorear los cambios temporales en el estado de degradación de las pasturas. Especialmente en relación a la pérdida o ganancia de carbono del suelo, arbustización y fertilidad.

Otra línea de trabajo futura es aplicar la metodología desarrollada para evaluar el estado de degradación de los pastizales naturales de la región. Estos ecosistemas ocupan una superficie de aproximadamente 24 millones de hectáreas siendo, después de los bosques, el segundo bioma en extensión en la región chaqueña (Mapbiomas, 2020). Los pastizales tienen gran importancia para la ganadería de la región dado que la vegetación natural es utilizada como fuente de forraje. Además, estos ambientes proporcionan múltiples servicios ambientales (almacenamiento de C, hábitat para la fauna silvestre, reserva de recursos genéticos, regulación hídrica de las cuencas, espacios recreativos, etc.).

En conclusión, en el presente estudio desarrollamos una metodología basada en información satelital y relevamientos de campo para estimar y cartografiar el estado de degradación de las pasturas del Gran Chaco Americano. Consideramos que esta metodología, al estandarizar por precipitaciones, es apropiada para evaluar la degradación en regiones con fuertes gradientes ambientales que determinan el potencial productivo. De esta manera, la línea de base generada en este estudio es de utilidad para identificar las áreas con potencial de recuperación, priorizar líneas de investigación para la restauración de pasturas degradadas y monitorear a futuro los efectos del manejo y de la variabilidad climática, por ejemplo, sobre el secuestro de C en estos ambientes.

Bibliografía

- Abatzoglou, J.T., SZ Dobrowski, S.A. Parks, K.C. Hegewisch, 2018, Terraclimate, un conjunto de datos globales de alta resolución sobre el clima mensual y el balance hídrico climático de 1958-2015, *Scientific Data* 5: 170191, doi: 10.1038 / sdata.2017.191.
- Andrade, R. G., Sanches, I. A., Rodrigues, C. A. G., Torresan, F. E., & Quartaroli, C. F. (2010). Classificação preliminar de pastagens degradadas em microbacias da região de Guararapes-SP. In Embrapa Territorial-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: SEMANA DE MEIO AMBIENTE, 6., 2010. Viçosa, MG. Anais... Viçosa, MG: CBCN, 2010.
- Bai, Z.G., Dent, D.L., Olsson, L., Schaepman, M.E. (2008). Proxy global assessment of land degradation. *Soil Use and Management*, 24, 223-234.
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., Huete, A.R., (1995). A review of vegetation indices. *Remote Sens. Rev.* 13, 95-120.
- Baumann, M., Israel, C., Piquer-Rodríguez, M., Gavier-Pizarro, G., Volante, J. N., & Kuemmerle, T. (2017). Deforestation and cattle expansion in the Paraguayan Chaco 1987–2012. *Regional Environmental Change*, 17(4), 1179-1191.
- Betancourt, H. 2006. Evaluación bioeconómica del impacto de la degradación de pasturas en fincas ganaderas de doble propósito en El Chal, Petén, Guatemala. Thesis Mg. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 91p.
- Blanco, L. J., Ferrando, C. A., Biurrun, F. N., Oriente, E. L., Namur, P., Recalde, D. J., & Berone, G. D. (2005). Vegetation responses to roller chopping and buffelgrass seeding in Argentina. *Rangeland ecology & management*, 58(3), 219-224.
- Brassiolo M. M. (2015). Bosques Nativos de la Región Chaqueña. Fichas técnicas. 1º Ed. REDAF 2015. ISBN 978-987-29208-1-4.
- Borráz, M., Manghi, E., Miñarro, F., Mónaco, M., Navall, M., Peri, P. y Preliasco M. (2017). Acercando el manejo de bosque con ganadería integrada al monte chaqueño. Una herramienta para lograr una producción compatible con la conservación del bosque. Buenas prácticas para una ganadería sustentable. Fundación Vida Silvestre. Buenos Aires.
- Bremner J.M. 1996. Nitrogen Total. En: *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. Ed. Sparks DL. SSSA. Madison WI. pp 1149-1176.
- Brown, A. (2009). Las selvas pedemontanas de las Yungas. Manejo sustentable y conservación de la biodiversidad de un ecosistema prioritario del noroeste Argentino. En Brown, A., y Lomascolo, T., (eds). *Selva pedemontana de las Yungas: Historia natural, ecología y manejo de un ecosistema en peligro*. Tucumán, Argentina: Editoriales del subtrópico.
- Burrell, A.L., JP Evans, Y Liu, 2017, Detecting dryland degradation using Time Series Segmentation and Residual Trend analysis (TSS-RESTREND), *Remote Sensing of Environment* 197: 43-57.
- Cohen, W.B., Maersperger, T.K., Gower, S.T., Turner, D.P., (2003). An improved strategy for regression of biophysical variables and Landsat ETM+ data. *Remote Sens. Environ.* 84, 561-571.
- Cornachione M. 2018. Avance en gramíneas megatermicas. Expectativas en el ambiente subtropical semiárido en la provincia de Santiago del Estero. En: *Ganadería santiagueña. Perspectivas de la producción en la cadena de valor*. Ed. Gobierno de Santiago del Estero. pp 84-93.
- Cornachione M. y Reineri P.S. 2008. ¿Cuánto produce el gatton panic?. Informe web. http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pasturas_cultivadas_megatermicas/
- de Jong, R., de Bruin, S., de Wit, A., Schaepman, M.E., Dent, D.L. (2011). Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, 115, 692-702.
- Escalante Torres, M.A. 2015. Estado de degradación de las pasturas de la asociación de ganaderos de Aucayacu- La morada. Tesis. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María – Perú.
- Evans, J., & Geerken, R. (2004). Discrimination between climate and human-induced dryland degradation. *Journal of Arid Environments*, 57(4), 535–554.
- Fernández, P. D., de Waroux, Y. L. P., Jobbágy, E. G., Loto, D. E., & Gasparri, N. I. (2020a). A hard-to-keep promise: Vegetation use and aboveground carbon storage in silvopastures of the Dry Chaco. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 303, 107117.
- Fernández, P. D., Kuemmerle, T., Baumann, M., Grau, H. R., Nasca, J. A., Radrizzani, A., & Gasparri, N. I. (2020b). Understanding the distribution of cattle production systems in the South American Chaco. *Journal of Land Use Science*, 15(1), 52-68.
- Ferrando, C. A., Namur, P., Blanco, L. J., Berone, G. D., & Vera, T. A. (2005). Módulo experimental de cría sobre buffel grass-pastizal natural en los llanos de la Rioja. In *Congreso Argentino de Producción Animal*. 28. 2005 10 19-21, 19 al 21 de Octubre de 2005. Bahía Blanca. AR.
- Ferreira, G. C. V., & Neto, J. A. F. (2018). Usos de geoprocessamento na avaliação de degradação de pastagens no assentamento ilha do coco, Nova Xavantina-Mato Grosso, Brasil. *Revista Engenharia na Agricultura*, 26(2), 140-148.
- Fumagalli, A.E. y Kunst, C.R. 2002. Producción de carne vacuna en el NOA: cómo mejorar la oferta forrajera de los sistemas de cría. En: *IDIA XXI: revista de información sobre investigación y desarrollo agropecuario*, V. 2, Nº 2, pp. 73-78
- Gaitán J.J., Bran, D., Oliva, G., Ciari, G., et al. (2013) Evaluating the performance of multiple remote sensing indices to predict the spatial variability of ecosystem structure and functioning in Patagonian steppes. *Ecological Indicators*, 34, 181–191.

- Gao, Q., Wan, Y., Lin, E., Xiong, W., Jiangcun, W., Wang, B., & Li, W. (2006). Grassland degradation in Northern Tibet based on remote sensing data. *Journal of Geographical Sciences*, 16(2), 165-173.
- Giménez, R., J. L. Mercau, J. Houspanossian, and E. G. Jobbágy. 2015. Balancing agricultural and hydrologic risk in farming systems of the Chaco plains. *Journal of Arid Environments* 123:81-92.
- Hein, L., De Ridder, N. 2006. Desertification in the Sahel: a reinterpretation. *Global Change Biology* 12(5): 751-758.
- Helldeń, U., Tottrup, C. 2008. Regional desertification: A global synthesis. *Global and Planetary Change* 64(3-4): 169-176.
- Herrmann, S. M., Anyamba, A., & Tucker, C. J. (2005). Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environmental Change Human and Policy Dimensions*, 15(4), 394-404.
- Jackson, R.D., Huete, A.R., (1991). Interpreting vegetation indices. *Prev. Vet. Med.* 11, 185-200.
- Jobbágy, E. G., M. D. Noretto, C. S. Santoni, and G. Baldi. 2008. El desafío ec hidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana. *Ecología Austral* 18(3):305-322.
- Knauer, K.; Gessner, U.; Fensholt, R.; Kuenzer, C. An ESTARFM Fusion Framework for the Generation of Large-Scale Time Series in Cloud-Prone and Heterogeneous Landscapes. *Remote Sens.* 2016, 8, 425.
- Macchi, L., H. R. Grau, P. V. Zelaya, and S. Marinaro. 2013. Trade-offs between land use intensity and avian biodiversity in the dry Chaco of Argentina: A tale of two gradients. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 174:11-20.
- Magliano, P. N., Fernández, R. J., Florio, E. L., Murray, F., & Jobbágy, E. G. (2017). Soil physical changes after conversion of woodlands to pastures in dry Chaco Rangelands (Argentina). *Rangeland Ecology & Management*, 70(2), 225-229.
- Mastrangelo, M. E., and M. C. Gavin. 2014. Impacts of agricultural intensification on avian richness at multiple scales in Dry Chaco forests. *Biological Conservation* 179:63-71.
- Muñoz Iniestra D.J, Ferreira Ramírez M., Escalante Arriaga I.B. y López García J. 2013. Relación entre la cobertura del terreno y la degradación física y biológica de un suelo aluvial en una región semiárida. *Terra latinoamericana* Vol. 31, N° 3.
- Myneni, R.B., Hall, F.G., Sellers, P.J., Marshak, A.L. 1995. The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33(2): 481-486
- Osinaga, N., Álvarez, C. R., & Taboada, M. A. (2017). Effect of deforestation and management on soil carbon stocks in the South American Chaco. In *Proceedings of the Global Symposium on Soil Organic Carbon 2017*, Rome, Italy, 21-23 March, 2017 (pp. 475-479). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Padilla, C.; Crespo, P. y Sardiñas Y. 2009. Degradación y recuperación de pastizales. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. Tomo 43. N° 4.
- Periago, M. E., V. Chillo, and R.A. Ojeda. 2015. Loss of mammalian species from the South American Gran Chaco: empty savanna syndrome? *Mammal Review* 45(1):41-53.
- Pettorelli, N., Vik, J.O., Mysterud, A., Gaillard, J.M., Tucker, C.J., Stenseth, N.C. 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology and Evolution* 20(9): 503-510.
- Prince, S.D. (1991) Satellite remote sensing of primary production: comparison of results for Sahelian grasslands 1981-1988. *International Journal of Remote Sensing*, 12, 1301-1311.
- Prince, S.D., Wessels, K.J., Tucker, C.J., Nicholson, S.E. 2007. Desertification in the Sahel: a reinterpretation of a reinterpretation. *Global Change Biology* 13(7): 1308-1313.
- Quiroga, V. A., A. J. Noss, A. Paviolo, G. I. Boaglio, and M. S. Di Bitetti. 2016. Puma density, habitat use and conflict with humans in the Argentine Chaco. *Journal for Nature Conservation* 31:9-15.
- Rhoades, J. D., 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. In: Sparks DL (Ed.), *Methods of soil analysis*. Part 3: Chemical methods. USA: SSSA - ASA, Madison WI pp. 417-436.
- Rojas JM, Prause J, Sanzano GA, Arce OEA & MC Sánchez. 2016. Soil quality indicators selection by mixed models and multivariate techniques in deforested areas for agricultural use in NW of Chaco, Argentina. *Soil and Tillage Research*. 155, 250-262. doi:10.1016/j.still.2015.08.010.
- Rojas JM, Buschiazzi DE & OEA Arce. 2013. Parámetros edáficos relacionados con erosión eólica en Inceptisoles de Chaco. *Ciencia del Suelo* 31 (1), 133-142.
- Roncedo C.S., Pérez H.E. y Corbella, R. 2003. Metodología para evaluar pasturas tropicales degradadas: *Chloris gayana* kunth cv. Común en la llanura deprimida de Tucumán, argentina. Tercera reunión de producción vegetal y primera de producción animal del NOA. S.M. de Tucumán.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., (1973). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I: 309-317.
- Somovilla Lumbreras, D., Páez, R., Jobbágy, E. G., & Noretto, M. D. (2019). Cambios en el contenido de carbono orgánico del suelo tras el rolado de bosques secos en San Luis (Argentina). *Ecología austral*, 29(1), 112-119.
- Song, X.-P., M. C. Hansen, P. Potapov, B. Adusei, J. Pickering, M. Adami, A. Lima, V. Zalles, S. V. Stehman, and C. M. Di Bella. 2021. Massive soybean expansion in South America since 2000 and implications for conservation. *Nature Sustainability*:1-9.
- Souza Jr, C. M., Roberts, D. A., & Cochrane, M. A. (2005). Combining spectral and spatial information to map canopy damage from selective logging and forest fires. *Remote Sensing of Environment*, 98(2-3), 329-343.
- The Nature Conservancy (2005). Fundación Vida Silvestre Argentina (FVSA), Fundación para el Desarrollo Sustentable del Chaco (DeSdel Chaco) y Wildlife Conservation Society Bolivia (WCS). Evaluación Ecorregional del Gran Chaco Americano / Gran Chaco Americano. Buenos Aires, Argentina.
- Tomanek, E. (2020). Peladares: Ambientes degradados del Chaco semiárido en Formosa Argentina. Tesis de Posgrado. Universidad Europea del Atlántico. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/724>.

- Tucker, C.J., Vanpreat, C.L., Sharman, M.J., Van Ittersum, G. (1985). Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel: 1980-1984. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 233-249.
- Verbesselt, J., Hyndman, R., Newnham, G., & Culvenor, D. (2010). Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 114, 106-115.
- Verstraete, M.M., Hutchinson, C.F., Grainger, A., Stafford Smith, M., et al. (2011). Towards a global drylands observing system: observational requirements and institutional solutions. *Land Degradation & Development*, 22, 198-213.
- Volante, J. N., Mosciaro, M. J., Gavier-Pizarro, G. I., & Paruelo, J. M. (2016). Agricultural expansion in the Semiarid Chaco: Poorly selective contagious advance. *Land use policy*, 55, 154-165.
- Vogt, J.V., Safriel, U., Von Maltitz, G., Sokona, Y., et al. (2011). Monitoring and assessment of land degradation and desertification: towards new conceptual and integrated approaches. *Land Degradation & Development*, 22, 150-165.
- Walkley, A & I A Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37:29-38.
- Wessels, K. J., Prince, S. D., Malherbe, J., Small, J., Frost, P. E., & VanZyl, D. (2007). Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa. *Journal of Arid Environments*, 68(2), 271-297.
- Wessels, K.J. 2009. Letter to the editor: comments on 'Proxy global assessment of land degradation' . *Soil Use and Management* 25: 91-92.
- Wessman, C.A., (1994). Remote sensing and the estimation of ecosystem parameters and functions. *Remote Sens.* 4, 39-56.
- Wolf Celoné U.I. 2013. Baja productividad de pasturas y pastizales. ¿Cómo llegamos a esta situación? Informe https://inta.gob.ar/sites/default/files/informe_tecnico_-_ursula_wolf.pdf.

ANEXO I.

Protocolo para la evaluación de la degradación en pasturas de la región del Chaco

La presente propuesta metodológica se enmarca en el marco del Acuerdo de Cooperación entre el INTA y The Nature Conservancy, cuyo objetivo general es elaborar un mapa del estado de degradación de pasturas en la región chaqueña de Argentina y Paraguay mediante el análisis de imágenes satelitales y validación a campo.

El presente documento busca definir una metodología, basada en indicadores de evaluación sencilla, para evaluar sitios de campo que se utilizarán para validar el mapa obtenido a partir del análisis de imágenes satelitales.

Información de contexto

La evaluación de campo se realizará en sitios ubicados dentro de lotes o potreros implantados con pasturas. Para realizar el muestreo de campo, se identificarán, en el mapa preliminar obtenido del análisis de imágenes satelitales, lotes con pasturas con distintos niveles de degradación en las diferentes subregiones del Chaco.

Se contactará al productor y buscará recabar información de contexto del lote dentro del cual estará ubicado el sitio de evaluación. Esta información puede ser relevante para interpretar los resultados del relevamiento.

Entrevista al productor

Pautas para la entrevista con el productor:

Es importante comenzar la charla explicando al productor el estudio que se está realizando y la utilización que se hará de los datos. Cada técnico utilizará sus propias palabras para explicarlo. A modo orientativo:

El estudio consiste en un relevamiento de las pasturas de la región chaqueña. Se buscará caracterizar el estado y potencial productivo de las pasturas de la región, para lo cual se tomarán datos en unos 200 campos.

Es importante dejar claro que la participación es voluntaria. Por lo tanto, se deberá pedir autorización para realizar observaciones/mediciones de la vegetación, tomar muestras de suelo y hacerle algunas preguntas sobre 1 o 2 lotes del campo. Asimismo, se deberá garantizar que los datos recabados son anónimos y se utilizarán exclusivamente con fines técnicos en el marco del estudio mencionado.

Se buscará relevar información de contexto sobre el lote donde se ubicará el sitio de muestreo. En caso de realizar el muestreo en más de un lote en un mismo predio, se deberá recabar esta información para cada uno de los lotes.

¿En qué año se desmontó o habilitó el lote? Año: _____

¿En qué año se implantó la pastura? Año: _____

¿Qué uso tuvo el lote desde el año en que se desmontó hasta el año que se implantó la pastura?

--

¿Qué laboreos se realizaron para implantar la pastura?

--

¿Considera que logró una buena implantación?

Si	No	¿Porqué? (describir)
----	----	----------------------

¿Cuáles son las principales especies y cultivares implantadas en el lote? (Ej. Gatton panic, Buffel cv Texas)

--

¿Cuál es la principal actividad ganadera del lote? (Si corresponde, puede marcar más de una opción)

Cría	Recría	Engorde
------	--------	---------

¿Cómo evalúa la productividad forrajera del lote? (marcar una sola opción)

Mala	Regular	Buena	Muy buena	Excelente
------	---------	-------	-----------	-----------

¿Cuál es la carga animal utilizada en los últimos años? (Si existe, agregar un valor) _____ cab/ha

Carga baja	Carga moderada	Carga alta	Carga muy alta
------------	----------------	------------	----------------

¿En los últimos 5 años, observó una caída en la producción de la pastura a través del tiempo? (una opción)

No estoy seguro	No	Si
-----------------	----	----

Si la respuesta fue "Si". ¿Qué fue lo que observó en los últimos años? (puede marcar más de una opción)

Pérdida de vigor o "amarillamiento" del pasto	Aumentó de suelo descubierto	Aparición de malezas herbáceas	Invasión de leñosas (renoval)	Ataques de plagas ¿Cuáles? _____	Otras: _____
---	------------------------------	--------------------------------	-------------------------------	----------------------------------	--------------

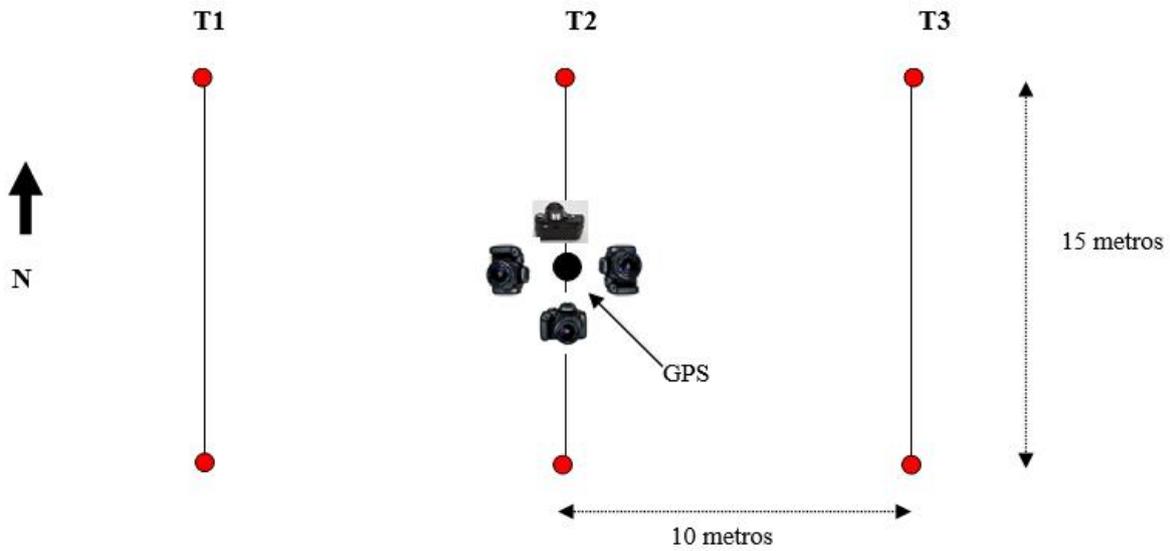
¿Realizó alguna de práctica para revertir la caída de producción de las pasturas? (puede marcar más de una opción)

Laboreo del suelo (rolo, rastra)	Desmalezadora	Control de renoval	Manejo del pastoreo	Fertilización	Incorporar leguminosa	Cambio especie y/o cultivar	Fuego	Otras: _____
----------------------------------	---------------	--------------------	---------------------	---------------	-----------------------	-----------------------------	-------	--------------

Evaluación del sitio de muestreo

Se propone la instalación de sitios de evaluación de pasturas siguiendo el diseño de la Figura 1. En estas parcelas se tomarán fotografías, se medirá la cobertura aérea y basal de la vegetación, se tomarán muestras de suelo y se evaluarán indicadores visuales de procesos erosivos.

En cada sitio se colocarán 3 transectas (T1, T2 y T3) de 15 metros de longitud, separadas por 10 metros entre sí. En cada transecta se estirará una cinta métrica lo más tensa y cercana a la superficie del suelo posible.



Coordenadas geográficas:

En el centro (7,5 m) de la T2 se tomarán las coordenadas geográficas del sitio con GPS.
 Formato: $gg^{\circ} mm' ss, s''$

Identificación del Sitio:

Para la identificación de las parcelas de la red nacional de monitoreo se propone un esquema común de siglas y números. Cada parcela se identificará con 2 letras que indican el Tipo de Tierra (PC: Pasturas Chaqueñas), seguida de 2 letras que indican el Nodo (NN) y luego un número de 3 cifras que indica el número correlativo de la parcela (XXX): **TT-NN-XXX**

NN identifica al Nodo. Se usará la siguiente nomenclatura:

Tabla 2. Codificación de nodos

Nodo	Código
Salta	SA
Corrientes	CO
Ing. Juárez	IJ
Sáenz Peña	SP
Stgo. del Estero	SE
El Colorado	EL
Colonia Benítez	CB
Chamical	CM
IIACS	II
Quimili	QU
Yuto	YU
San Luis	SL
Famaillá	FA

A modo de ejemplo, los sitios del Nodo Quimilí se identificarán de la siguiente manera:

PC-QU-001

PC-QU-002

PC-QU-003 ...etc.

Fotografías:

Las fotografías se usan para evaluar la pastura en forma cualitativa, debiéndose obtener desde puntos fijos y utilizando ópticas similares. Asimismo, complementan los indicadores de los métodos cuantitativos.

Se tomarán 4 fotografías en posición horizontal, desde una altura de 160 cm, que incluya aproximadamente un 20% del cielo, para apreciar la fisonomía de la vegetación. Las fotografías se tomarán desde el punto central de la T2, una hacia cada punto cardinal (Figura 1).

Altura de la vegetación

Se registrará la altura del canopeo de las especies forrajeras (sin considerar las cañas florales).

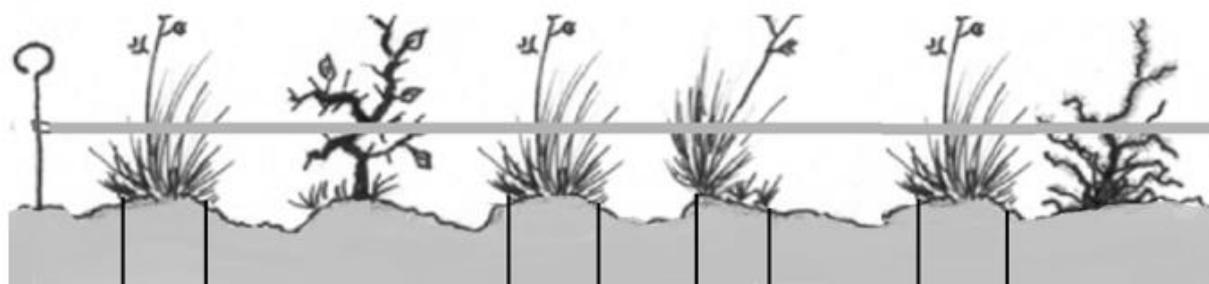
Las mediciones se realizarán con cinta métrica o metro de carpintero a lo largo de las 3 transectas. La altura se registrará cada 1 metro en la transecta, es decir en los toques correspondientes a los 100 cm, 200 cm, 300 cm...etc. Por lo tanto, se tomarán 15 datos de altura por transecta (45 en total).

En el caso de que el toque no caiga en una planta forrajera, la medición se realizará sobre el individuo más cercano a ese punto.

Cobertura basal

La cobertura basal de la vegetación se medirá sólo en los casos en que la pastura tenga una estructura de tipo "matas". La medición se realizará sólo sobre la T1.

Desde el inicio de la cinta métrica se establece el 0. El observador recorre la cinta, usando una aguja para proyectar una línea vertical al suelo, registrando el inicio y fin de cada parche ("mata" de la especie forrajera). Solo se medirán los parches de la especie forrajera y se tendrá en cuenta solamente la cobertura basal y no la proyección aérea. Se registrarán las matas interceptadas por la transecta y que se encuentran accesibles. Por lo tanto, matas debajo de leñosas, que se encuentren poco accesibles, no serán consideradas.



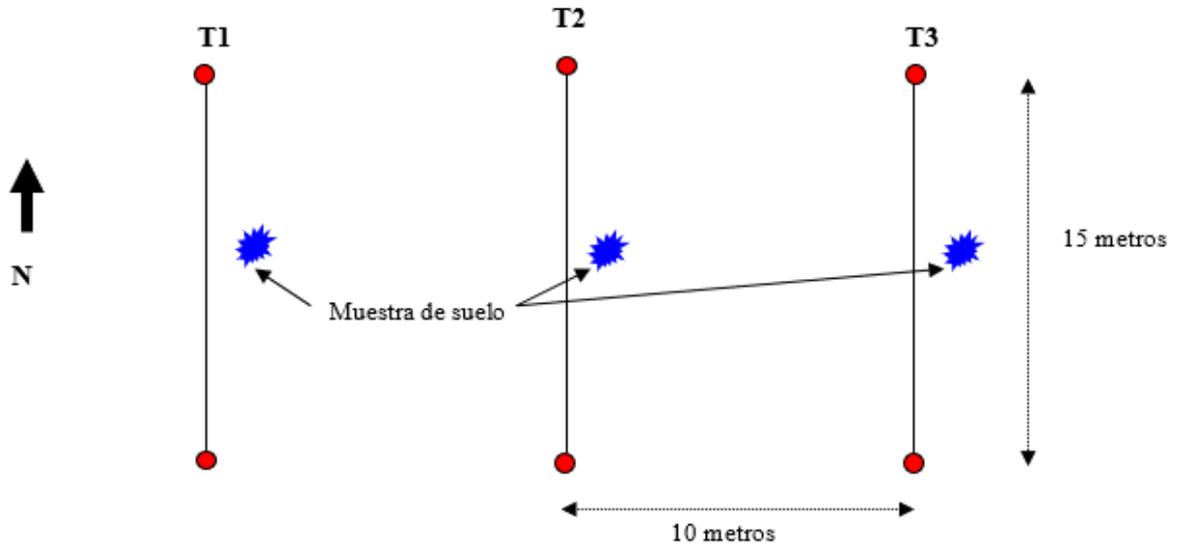
Tipo	I	P	I	P	I	P	I	P	I
Fin (cm)	30	59	153	180	208	228	288	321	398

I: Interpache

P: Parche de la sp. forrajera

Muestras de suelo

Dentro del sitio de observación se tomarán 2 muestras de suelo compuestas (0-10 cm y 10-30 cm). Cada muestra estará conformada por 3 submuestras, cada una de las cuales se tomará a 1 metro de distancia del punto central de cada Transecta.



En cada uno de los tres puntos de muestreo se realizará un pozo de 30 cm de profundidad con pala. De la pared del pozo se tomará, con cuchillo, una submuestra de suelo de aproximadamente 300-350 grs., de 0 a 10 cm y otra de 10 a 30 cm. Por lo tanto, la muestra compuesta tendrá aproximadamente 1 kg de muestra.

Rotulado de muestras

Para el rotulado de las muestras se utilizará el código de identificación de la parcela y se agregará la profundidad de muestreo y la sigla MC (muestra compuesta), por ejemplo:

PC-QU-001 (0-10MC)

PC-QU-001 (10-30MC)

En el caso de que no se pueda muestrear a estas profundidades, se indicará la profundidad efectivamente muestreada.

Este rotulado codificado servirá para reportar en bases de datos comunes, manteniendo la identificación de cada determinación.

Para las muestras de densidad aparente se utilizará el código de identificación de la parcela y se agregará la profundidad de muestreo, la sigla DAP y el número de submuestra, por ejemplo:

PC-QU-001 (0-10DAP1), PC-QU-001 (0-10DAP2), PC-QU-001 (0-10DAP3)

PC-QU-001 (10-30DAP1), PC-QU-001 (10-30DAP2), PC-QU-001 (10-30DAP3)

La bolsa de polietileno conteniendo la muestra se colocará dentro de otra bolsa del mismo material. Entre las 2 bolsas se colocará una etiqueta con el código de identificación de la muestra. Se sugiere utilizar la siguiente etiqueta:

Código:	Fecha:
Observador/es:	
Lat: ___ ° ___ ' ___ , ___ " Long: ___ ° ___ ' ___ , ___ "	
Profundidad:	N° submuestras:

Al regreso del campo, las muestras se pondrán a secar al aire. Luego serán conservadas hasta la definición del envío al laboratorio correspondiente. Para ello se mantendrán en ambiente protegido y fresco (idealmente en heladera), lo que asegura una baja actividad química y biológica.

Las determinaciones de laboratorio que se proponen son:

- Carbono orgánico: método Walkley y Black
- pH (en agua, relación 1:2,5)
- Conductividad eléctrica del extracto de saturación
- N total (Kjeldhal)

Textura al tacto

Se realizará una determinación de la textura del suelo en los primeros 30 cm. Se clasificará en 3 clases: gruesa, media o fina.

En el caso de detectarse un cambio textural que implique un cambio de clase (por ejemplo, textura media de 0 a 20 cm y textura fina de 20 a 30 cm) se registrará en observaciones.

Para determinar la textura al tacto recuerde que la arena es gruesa y áspera, el limo se percibe suave como la harina, y que la arcilla mojada es pegajosa y plástica.

Procedimiento:

Tome una muestra de suelo de unos 5 cm³, humedézcala con agua hasta el máximo de plasticidad y amásela entre los dedos índice y pulgar hasta destruir los agregados. Evalúe la textura según los siguientes criterios intentando moldear con la masa del suelo una bola o un "alambre".



Textura Gruesa:

Al frotar una pequeña muestra entre los dedos la percepción es áspera y no se observan presencia de partículas finas (limo y arcilla). Al agregar agua y tratar de formar una bola se disgrega fácilmente o se forma una bola muy débil que se desintegra fácilmente cuando se aprieta. No se pueden formar "alambres". Al frotar entre los dedos se continúa percibiendo áspero.

Textura media:

Se percibe que hay un contenido equilibrado de fracciones. En húmedo, al frotar entre los dedos la sensación es ni suave ni áspero (o levemente áspero). Se puede moldear una bola poco cohesiva que se fisura cuando se aprieta. Forma con dificultad "alambres" que tienen aspecto quebradizo

Textura fina:

Al humedecer es muy liso, uniforme y plástico. Se puede moldear una bola cohesiva que se deforma sin fisurarse al apretarse. Se pueden formar "alambres" que se pueden doblar en anillos.

Densidad aparente

Se tomarán 3 muestras de suelo para la determinación de la densidad aparente. El muestreo se realizará en sitios adyacentes a los pozos de extracción de las muestras de suelo.

Se realizará mediante el método del cilindro.

Las muestras se tomarán a 2 profundidades: 0-10 y 10-30 cm.

Se introduce el cilindro metálico en el suelo con ayuda de un taco de madera y una masa. Se "enrasa" el cilindro quitando el suelo de los extremos y de las paredes del cilindro.

Cada una de las 3 muestras extraídas en cada sitio se coloca en una bolsa de polietileno debidamente identificada.

Las muestras se llevan a laboratorio donde se secarán a 105°C durante 48 hs.

Se pesa la muestra seca y se calcula la Dap:

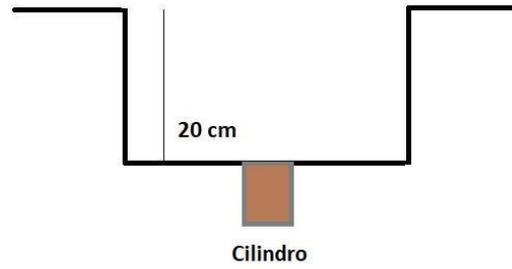
Dap = Peso seco de muestra / volumen del cilindro ($\pi \times$ radio del cilindro al cuadrado \times altura del cilindro).



DAP primera capa



DAP segunda capa



Indicadores de erosión

Para evaluar los indicadores de erosión hídrica y eólica se realizará un recorrido del sitio de muestreo (área definida por las transectas).

De acuerdo a las observaciones realizadas durante el recorrido se evaluará el tipo, extensión, estado y severidad de erosión hídrica y eólica. Se completará la siguiente planilla.

ID sitio:	Fecha:
Observador/es:	
Coordenadas Lat: __ ° __ ' __ " , __ ° __ ' __ " Long: __ ° __ ' __ " , __ "	

Tipo:	Laminar		Surcos					Cárcavas			
Extensión (%):	No hay signos		<5		5-10		10-25		25-50		>50
Estado:	Estable		Parcialmente estabilizado					Activo			
Severidad:	Nula		Baja		Moderada		Alta		Muy alta		

Tipo:	Deflación		Acumulación								
Extensión (%):	No hay signos		<5		5-10		10-25		25-50		>50
Estado:	Estable		Parcialmente estabilizado					Activo			
Severidad:	Nula		Baja		Moderada		Alta		Muy alta		

Tipo

Erosión Hídrica

Laminar: Proceso de erosión generado por una combinación de salpicado y escurrimiento laminar que remueve delgadas capas del suelo superficial.

Surcos: Pequeños canales, irregulares, poco profundos, de hasta 30 cm de ancho y profundidad. Signos: Canales poco

profundos que se extienden en el sentido de las pendientes dominantes.

Cárcavas: Canales irregulares, en forma de U o V, con paredes abruptas, formados en materiales sueltos, con profundidades que varían de 30 a 300cm, formadas por escurrimiento concentrado. Signos: Canales anchos, profundos e irregulares.

Erosión Eólica

Deflación: es la remoción de partículas del suelo que da como resultado una pérdida del suelo superficial. Los indicadores de este proceso son los pavimentos de erosión (cobertura de gravas

/ fragmentos gruesos en superficie), plantas con raíces expuestas u horizontes subsuperficiales expuestos (se puede confundir con la erosión hídrica laminar; en muchas situaciones ocurren simultáneamente).

Acumulación: puede tomar distintas formas:

-Campos de dunas bien desarrollados, parcial o totalmente cubiertos por vegetación. Áreas severamente afectadas por erosión eólica.

-Acumulación de material entrampado en los bordes de los potreros o en arbustos. Áreas moderadamente afectadas.

-Acumulaciones difusas: capas de arena de 2-3 cm, en parches de vegetación herbácea. Son características de áreas poco afectadas por erosión eólica.

Extensión

La extensión hace referencia al área afectada por cada uno de los tipos de erosión.

Estado

El estado de la erosión hace referencia a la intensidad del proceso en el momento del relevamiento a campo. Por ejemplo, un proceso puede estar activo (los surcos están creciendo) o estar en un estado estable (los surcos se están cubriendo de pastos).

Activo: El rasgo o indicador de erosión (por ej. los surcos) está aumentando su tamaño o extensión;

Parcialmente estabilizado: Entre activo y estable (una cárcava se puede estar estabilizando en algún sector y estar muy activa en otro);

Estable: Puede ser un rasgo relicto asociado a un tipo de uso pasado o un área que se estabilizó por alguna intervención (rehabilitación) que frenó el proceso de erosión

Severidad

La severidad hace referencia a la cantidad de suelo removido del lote.

Nula: No se aprecian signos de erosión

Baja: evidencias mínimas; principalmente salpicado (laminar) o surcos (E. Hídrica). Ligero movimiento de suelo visible (acumulación < 2 cm (E. Eólica).

Moderada: hay evidencias, pero los sedimentos removidos permanecen dentro del lote. Desarrollo incipiente de surcos (E. hídrica) pavimentos, plantas con raíces expuestas; montículos en forma de mantos (E. eólica).

Alta: los sedimentos son transportados fuera del lote. Surcos frecuentes y desarrollo incipiente de cárcavas (profundidad menor a 50 cm) (E. hídrica). Montículos, pavimentos sin costras, lenguas de erosión (acumulación y deflación), médanos (E. eólica).

Muy alta: cárcavas bien desarrolladas, profundidad mayor a 50 cm o erosión laminar que ha provocado una pérdida de más de 10 cm de suelo (E. Hídrica). Lenguas de erosión (acumulación y de deflación; peladares), pavimentos sin costras, hoyos de deflación, campos de médanos. Los sedimentos son removidos fuera de la UR y se produce un descenso de la superficie mayor a 10 cm. (E. Eólica).