

Implementación de un Sistema Silvopastoril Utilizando el Concepto de Sitio Ecológico: Caso Práctico

Ledesma R., Savino P., Coria D., Saracco F., Lopez J., Barraza G., Víctor
Navarrete, Oscar Rodríguez, César Rodríguez y Juan Carlos Rodríguez
Estación Experimental Agropecuaria Santiago del Estero



Índice

Índice de tablas	3
Índice de Figuras.....	3
Resumen.....	5
Capítulo 1: Introducción general.....	6
El área de estudio.....	6
Clima y suelo	8
La vegetación.....	9
El rodeo	10
Capítulo 2: Monitoreo del lote mediante índices de vegetación.....	12
¿Qué es el índice NDVI?	12
Metodología	12
Resultados	12
Conclusiones.....	14
Capítulo 3: Determinación de sitios ecológicos: metodología y los resultados.....	15
Concepto de sitio ecológico	15
Metodología	16
Coberturas vegetales.....	17
Resultados	17
Conclusiones.....	19
Capítulo 4: Rolado	20
La maquinaria.....	20
Entrenamiento a tractorista.....	22
Capítulo 5: Evaluación y manejo de suelos	24
Metodología	24
Resultados	25
Conclusiones.....	33
Capítulo 6: Evaluación y manejo del estrato herbáceo.....	34
Metodología	34
Resultados	35
Receptividad ganadera.....	37
Conclusiones.....	37
Capítulo 7: Evaluación y manejo de plantas leñosas	39

Metodología.....	39
Resultados.....	40
Conclusiones.....	45
Capítulo 8: Conclusiones e implicancias para el manejo	46
Agradecimientos	48
Referencias.....	48

Índice de tablas

Tabla 1: Análisis de la varianza entre los años estudiados, de las distintas propiedades de suelo analizadas del “sitio Alto” en cada una de las tres capas relevadas	25
Tabla 2: Análisis de la varianza entre los años estudiados, de las distintas propiedades de suelo analizadas del “sitio Bajo” en cada una de las tres capas relevadas.....	26
Tabla 3 proporciones relativas de las partículas de los suelos evaluados (% Arena, % Arcilla y % Limo), la clasificación en una clase textural, rango teórico de dap en base a la clase textura y la dap promedio registrada para cada sitio y cada profundidad	30
Tabla 4: Resultados de ANVA de la Ce (dS/m), entre los distintos años bajo estudio en cada una de las profundidades y sitios evaluados.....	31
Tabla 5: Receptividad ganadera calculada (usando un factor de uso de 0,5) y carga animal utilizada (factor de uso 0,8), para los sitios alto y bajo en la situación inicial y posterior al rolado.	37
Tabla 6: Parámetros del análisis de varianza (MLGM) para: a) CI, Cobertura por arbusto (m^2 por individuo); b) VI, Volumen por arbusto (m^3 por individuo); c) R, rebrotes (número); c) C, Cobertura arbustiva por hectárea ($m^2 \cdot ha^{-1}$) y d) V, Volumen arbustivo por hectárea (m^3 / ha^{-1}).	41
Tabla 7: Porcentaje de similitud en la composición de especies (índice Chao-Sorensen) entre la Situación inicial (SI) y el tratamiento Rolado (RBI) para cada sitio ecológico. Entre paréntesis se indican las clases de similitud: 0-39.9% (baja), 40-69.9% (moderada) y 70-100% (alta).....	45

Índice de Figuras

Figura 1: Ubicación del lote de 350 ha en el Departamento Figueroa, Santiago del Estero, Argentina (arriba). Perímetro del área de estudio al este de la subunidad geomorfológica Depresión de las Salinas, en la Llanura aluvial del Río Salado (abajo).	7
Figura 2: Modelo de elevación digital (arriba), donde los colores indican diferentes altitudes sobre el nivel del mar (msnm). Modelo topográfico 3D del lote 350ha (abajo), indicadas en color gris las picadas del lugar.....	8
Figura 3: Climodiagrama de Jumial Grande, Dpto Figueroa, Santiago del Estero a 32 km del área de estudio. Precipitaciones serie histórica (1990-2022). Estación meteorológica INTA en Dpto. Figueroa.....	9
Figura 4: Vegetación nativa del sitio alto (izquierda) y del bajo (derecha) previo a la implementación del rolado.	10
Figura 5: Estado del rodeo en Octubre de 2020.	10

Figura 6: Esquema de las evaluaciones de las distintas variables y las perturbaciones realizadas desde el 2019 al 2022.....	11
Figura 7: Imágenes Sentinel 2 y productos NDVI del área de estudio, mes de marzo de 2019 a 2022.....	13
Figura 8: Ubicación del lote experimental “1” y su colindante “2” superpuesto a imagen Sentinel 2 del 17 de abril de 2022.....	13
Figura 9: NDVI medio de los lotes Experimental (1) en verde y lote colindante (2) en rojo, en el período septiembre 2016 a marzo de 2023.....	14
Figura 10: a) Sitio ecológico altos, medias lomas y bajos en buen estado de conservación. b) Los mismos sitios ecológicos anteriores degradados por sobrepastoreo y sobre explotación forestal.	16
Figura 11: Mapa de sitios ecológicos del lote de 350 ha ubicado en el Dpto. Figueroa. Se indican también las picadas internas del lugar en color rojo.	18
Figura 12: Imagen satelital en colores reales (arriba). Imagen clasificada en 8 clases, los puntos negros muestran los puntos de observación a campo (abajo).	19
Figura 13: Rolos y tractor utilizados por el productor, tractor con rolo pequeño (primera foto); rolo pequeño con agregado de peso (segunda foto) para favorecer el corte de la leñosa; tractor y rolo de 2,5m usado en los lotes de media loma y bajo (tercera y cuarta foto).	21
Figura 14: leñosa arbustiva que no fue trozada correctamente por el rolo.	22
Figura 15: Capacitación a tractoristas (arriba). Visibilidad desde la cabina del tractor (abajo).	23
Figura 16: Niveles de COT (%) para cada uno de los años estudiados (1: 2019, 2; 2021 y 3: 2022) en la capa de suelo de 0-15 y 15-30 cm del sitio Alto.....	27
Figura 17: Niveles de COT (%) para cada uno de los años estudiados (1: 2019, 2; 2021 y 3: 2022) en la capa de suelo de 0-15 y 15-30 cm del sitio Bajo	28
Figura 18: Resultados de Ce (ds/cm) para cada uno de los años (1:2019, 2:2021 y 3:2022) de cada capa de suelo (0-15; 15-30 cm y 30-60 cm) del Sitio Alto, Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$, test de Tukey) entre los años para cada profundidad.....	31
Figura 19: Resultados de Ce (ds/cm) para cada uno de los años (1:2019, 2:2021 y 3: 2022) de cada capa de suelo (0-15; 15-30 cm y 30-60 cm) del Sitio Bajo, Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$, test de Tukey) entre los años para cada profundidad.....	32
Figura 20: Producción de biomasa herbácea (kg MS.ha ⁻¹) por sitio ecológico y por año, 2019, Situación Inicial y posterior al Rolado. Año 2021 al momento del muestreo aún no había sido rolado y sembrado (ver texto).	35
Figura 21: Frecuencia relativa (%) de especies de pasto encontradas, en los sitios alto y bajo en la situación inicial previa al rolado y posterior al mismo.	36
Figura 22: Densidad de arbustos (individuos.ha ⁻¹) y cobertura aérea (m ² .ha ⁻¹) en tres sitios ecológicos del Chaco semiárido en la situación inicial SI, y dos años después del Rolado (RBI: rolado de baja intensidad).	40
Figura 23: Densidad de arbustos discriminados por especies, en la situación inicial vs. después del rolado sitio Alto (arriba) y sitio Bajo (abajo).	42
Figura 24: Densidad de árboles (ind/ha), según clases diamétricas, en el sitio ecológico alto en la situación inicial y 2 años posterior al rolado.	43
Figura 25: Especies de árboles encontradas en el sitio alto después del rolado.	44
Figura 26: Riqueza acumulada de especies e intervalos de confianza a partir del método de rarefacción y extrapolación para leñosas arbóreas y arbustivas en los sitios alto y bajo antes del rolado (2019) y tres años después del rolado (2022).	44

Resumen

Los Sistemas Silvopastoriles SSP en la región Chaqueña son implementados con el fin de superar limitantes forrajeras y mantener los atributos del bosque. Es escasa la información sobre el mapeo de los sitios ecológicos que orienten a la correcta instalación de SSP. Por ello se acerca esta experiencia realizada en un establecimiento agropecuario en el que se llevó a cabo la implementación de un sistema silvopastoril bajo el enfoque de sitio ecológico y utilizando recomendaciones de manejo basadas en principios de sustentabilidad. En este trabajo se expone la metodología utilizada para realizar un diagnóstico de la situación inicial del establecimiento y el mapeo de los sitios ecológicos presentes en el área estudiada. Además, se detalla la práctica de rolado aplicada en los sitios, brindando información sobre su intensidad, características de la maquinaria y problemas prácticos durante su aplicación. Los atributos de la calidad del suelo, la productividad forrajera, la estructura de los estratos arbustivo y arbóreo y la diversidad vegetal se abordan desde un enfoque de manejo a escala de productor. Este informe busca ser un aporte práctico para el desarrollo de sistemas silvopastoriles en la región Chaqueña.

Palabras claves: Sistemas silvopastoriles, sitios ecológicos, pastos, arbustos, arboles.

Capítulo 1: Introducción general

La actividad ganadera en la región Chaqueña se desarrolla principalmente en bosques, pastizales y sabanas con una baja productividad forrajera y receptividad ganadera, de 12 hasta 20 has/UG (hectáreas por unidad ganadera) y un exceso de leñosas arbustivas (más de 10000 plantas/m²). Estas características dificultan el manejo y la accesibilidad. Las principales causas del deterioro del estrato herbáceo se deben principalmente al sobrepastoreo, la explotación forestal y cambios en el régimen del fuego. A causa de estas limitantes productivas los productores implementan el manejo silvopastoril mediante el rolado, entre otras prácticas. Este trabajo presenta los resultados obtenidos en un campo ganadero ubicado en el Departamento Figueroa, Santiago del Estero (Figura 1). Se siguió la metodología de la “Guía de Sistemas Silvopastoriles de Santiago del Estero”, cuyos aspectos centrales son: 1) planificar el manejo a partir de la sectorización de los ambientes homogéneos del predio productivo, utilizando el concepto de sitio ecológico y estados de la vegetación, 2) habilitar los sistemas silvopastoriles utilizando la tecnología denominada “Rolado de Baja Intensidad (RBI)” 3) evaluar los efectos de las prácticas de manejo aplicadas 4) mediante el manejo adaptativo realizar los ajustes necesarios para mantener y mejorar las características productivas y ecológicas del sistema.

Específicamente, se trabajó sobre un lote de 350 ha destinado a la implementación de sistemas silvopastoriles sustentables. En orden cronológico, los pasos seguidos fueron:

1. Mapeo de los sitios ecológicos y las coberturas vegetales.
2. Caracterización de la vegetación leñosa y herbácea y calidad del suelo de cada sitio ecológico.
3. Rolado de los lotes con readecuación de la maquinaria y capacitación del personal.
4. Evaluación del efecto post-rolado en la respuesta de la vegetación leñosa y herbácea y calidad del suelo de cada sitio ecológico.
5. Ajustes del manejo de la vegetación y del rodeo.

El área de estudio

El área de estudio comprende un lote de 350 ha de un establecimiento ganadero ubicado en el paraje La Ramada, Departamento Figueroa, Santiago del Estero, Argentina.

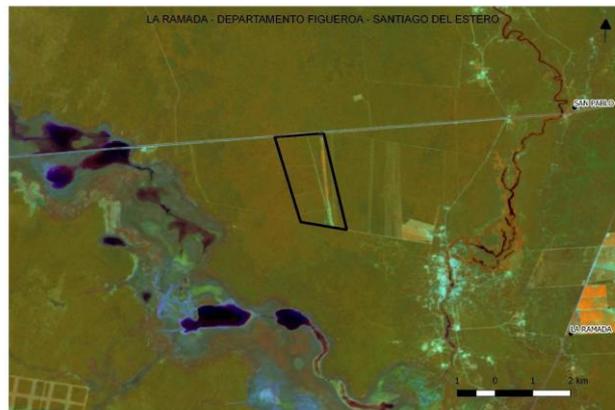


Figura 1: Ubicación del lote de 350 ha en el Departamento Figueroa, Santiago del Estero, Argentina (arriba). Perímetro del área de estudio al este de la subunidad geomorfológica Depresión de las Salinas, en la Llanura aluvial del Río Salado (abajo).

La Figura 2 muestra un modelo de elevación digital y un modelo topográfico, en los cuales, a grandes rasgos, se aprecia que el lote presenta áreas más bajas especialmente en el área central, al noroeste y sudoeste. Hacia el sur del lote, se aprecia un área más elevada. En cambio, hacia el noreste, se aprecia un área de lomadas con pendientes más marcadas.

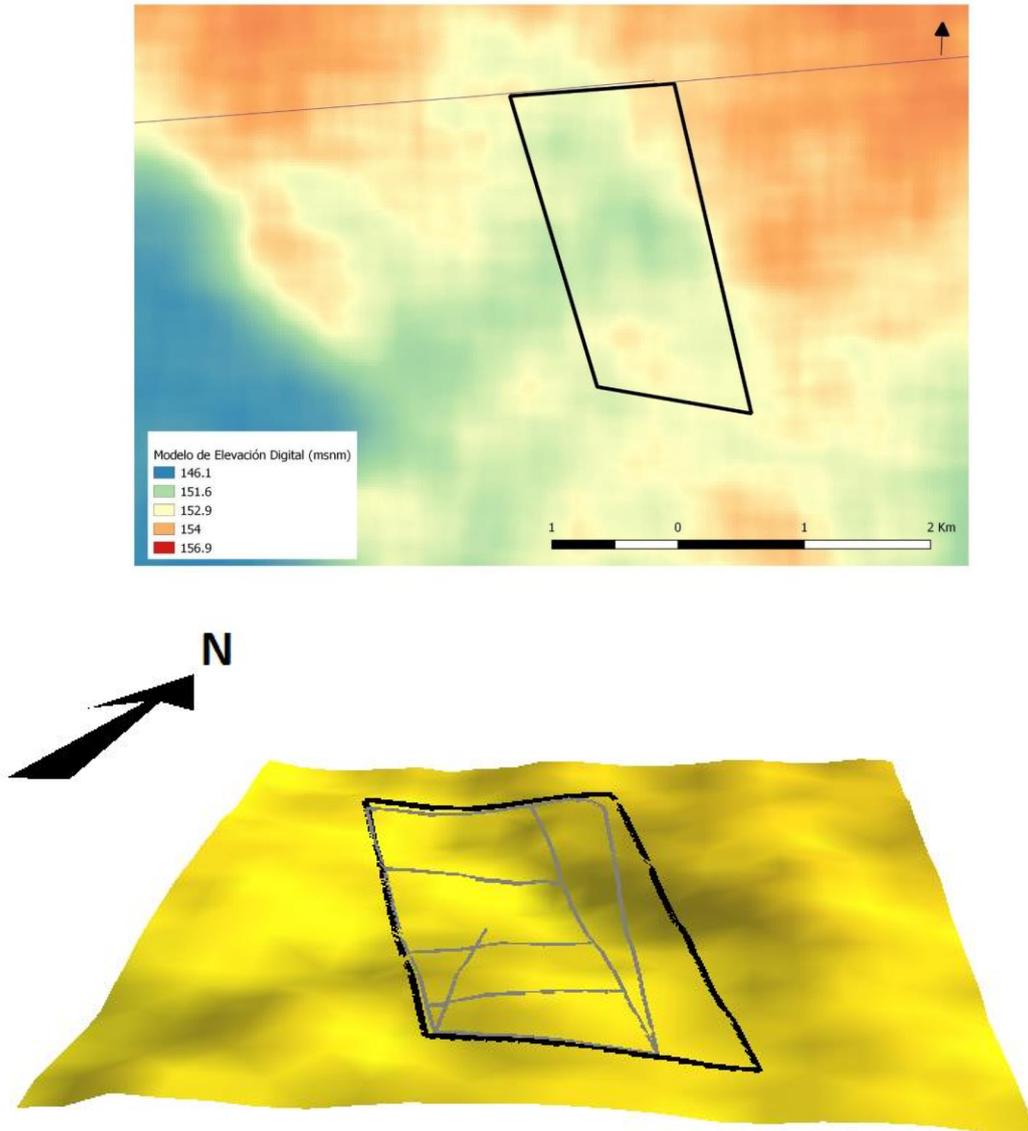


Figura 2: Modelo de elevación digital (arriba), donde los colores indican diferentes altitudes sobre el nivel del mar (msnm). Modelo topográfico 3D del lote 350ha (abajo), indicadas en color gris las picadas del lugar.

Clima y suelo

El clima es semiárido, la temperatura media anual es de 22°C. Se destaca la amplitud térmica de alrededor de 30°C entre el promedio de las temperaturas mínimas (6,4°C) y máximas (36,1°C) y la alta evapotranspiración potencial de 1000 mm anuales, lo que provoca déficit hídrico todo el año (Torres Bruchmann 1981; Boletta 1988). El promedio histórico de precipitaciones (1991-2020) en la Estación meteorológica ubicada en Jumial Grande a 32 km del área de estudio es de 645 mm anuales. Las precipitaciones se concentran entre los meses de octubre y mayo (Fig. 3).

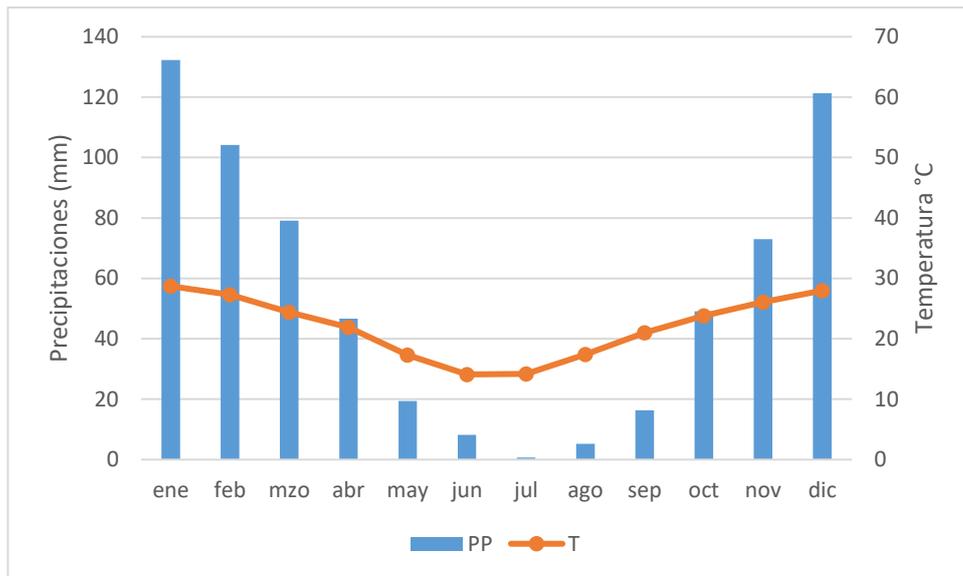


Figura 3: Climodiagrama de Jumial Grande, Dpto Figueroa, Santiago del Estero a 32 km del área de estudio. Precipitaciones serie histórica (1990-2022). Estación meteorológica INTA en Dpto. Figueroa.

El suelo es clasificado como Torriortent ústico moderadamente salino, franco limoso; el paisaje general es una planicie aluvial migratoria, con escurrimiento medio a lento, de permeabilidad moderada, con buen drenaje y sin peligro de inundación.

La vegetación

Las especies que componen el estrato arbóreo (>3m) son: *Cercidium praecox*, *Stetsonia coryne*, *Geoffroea decorticans*, *Ziziphus mistol*, *Schinus fasciculata*, *Tabebuia nodosa*, *Aspidosperma quebracho blanco*, *Schinopsis lorentzii*, *Cereus forbesii*, *Prosopis ruscifolia*. Entre las especies arbustivas (<3m) se encuentran: *Ximenia americana*, *Aloysia sp.*, *Prosopis pugionata*, *Capparis atamisquea*, *Cercidium praecox*, *Geoffroea decorticans*, *Lycium sp.*, *Suaeda sp.*, *Lycium sp.*, *Schinus fasciculata*, *Celtis ehrenbergiana*, *Mimozyanthus carinatus*. Esta última también alcanza alturas hasta de 8 m, con porte arbóreo y se presenta dominando los sitios conformando “latales” densos de difícil acceso para el ganado. Entre las especies del estrato herbáceo prevalecen *Gowinia latifolia*, *Setaria lehianta*, *Trichloris crinita* y *Trichloris pluriflora* y varias latifoliadas.



Figura 4: Vegetación nativa del sitio alto (izquierda) y del bajo (derecha) previo a la implementación del rolado.

El rodeo

En el establecimiento agropecuario se crían alrededor de 120 animales, sin disponibilidad de estacionamiento de servicio. Estos animales pastorean en los sitios estudiados desde el otoño hasta el inicio de la primavera, y el tiempo de pastoreo se ajusta según la condición y productividad de la pastura. Además, durante el pastoreo, los animales reciben un suplemento alimenticio de semilla de algodón equivalente al 5% de su peso vivo.



Figura 5: Estado del rodeo en octubre de 2020.

En el siguiente esquema se resume un cronograma de las evaluaciones a campo y perturbaciones (rolado y pastoreo) que se realizaron durante los años de estudio (2019-2022). La información de metodologías será descrita en cada capítulo.



Alto

<u>Evaluaciones</u> Delimitación de sitios a campo (otoño) Leñosas (otoño) Pastos (otoño) Suelo (invierno)		<u>Evaluaciones</u> Leñosas (otoño) Pastos (otoño) Suelo (invierno)	<u>Evaluaciones</u> Leñosas (otoño) Pastos (otoño) Suelo (invierno)
<u>Perturbaciones</u> Rolado (primavera)	<u>Perturbaciones</u> Rolado (otoño--invierno)	<u>Perturbaciones</u> Pastoreo (invierno)	<u>Perturbaciones</u> Pastoreo (invierno)

Bajo

<u>Evaluaciones</u> Delimitación de sitios a campo (otoño) Leñosas (otoño) Pastos (otoño) Suelo (invierno)		<u>Evaluaciones</u> Leñosas (otoño) Pastos (otoño) Suelo (invierno)	<u>Evaluaciones</u> Leñosas (otoño) Pastos (otoño) Suelo (invierno)
	<u>Perturbaciones</u> Rolado (invierno-primavera)	<u>Perturbaciones</u> Pastoreo (invierno)	<u>Perturbaciones</u> Pastoreo (invierno)

Figura 6: Esquema de las evaluaciones de las distintas variables y las perturbaciones realizadas desde el 2019 al 2022.

Capítulo 2: Monitoreo del lote mediante índices de vegetación

La disponibilidad de imágenes hoy en día es muy extensa, las imágenes Sentinel-2 distribuidas por la Agencia Espacial Europea (ESA) son ampliamente utilizadas por ser de libre distribución y por su resolución espacial, temporal y espectral.

La resolución espacial es la unidad mínima de información incluida en la imagen (píxel), mientras que la resolución temporal se refiere a la periodicidad con la que éste adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre, Sentinel 2 tiene un tiempo de revisita de 5 días. La resolución espectral es el número de bandas en la que el sensor puede registrar la energía que se refleja desde la superficie. Estas características, las convierte en una opción muy interesante para el seguimiento de cubiertas vegetales especialmente de gran extensión.

¿Qué es el índice NDVI?

El índice **NDVI** (en inglés, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado), más conocido como índice verde, es un indicador del vigor de la vegetación. Este índice utiliza las bandas NIR y rojo del espectro electromagnético para estimar un indicador adimensional entre **-1** y **1**, donde valores cercanos a 1 indican **vigorosidad de la vegetación** y cercanos a 0, **ausencia de la misma**.

El índice NDVI, se calcula a partir de la siguiente fórmula:

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

Metodología

Los índices de vegetación (IV) constituyen un resumen de la información satelital correspondiente a la vegetación. Los IV se han usado en los últimos años para determinar el tipo de cobertura, evaluar su variación temporal o establecer su estado de salud a partir de estimaciones de características como vigor vegetal, contenido de clorofila, estado nutricional o estado hídrico. En diversos estudios, se han propuesto una variedad de índices de vegetación que usan diferentes bandas en el espectro visible e infrarrojo cercano para obtener características de interés.

Resultados

La disponibilidad de imágenes satelitales (libres de nubes) permite realizar un monitoreo temporal del NDVI con el fin de observar su evolución en el tiempo. En la Figura 7 se observan las imágenes satelitales de los meses de marzo de los años 2019 a 2022 (arriba), mes en el que el índice alcanza los valores más altos, y sus respectivos NDVI (abajo).

El índice verde permite monitorear los lotes y tomar decisiones de manejo. Los valores altos, (mayores a 0.6) se ven en tonos de verde oscuros y representan la vegetación sana y abundante. La vegetación estresada se sitúa entre 0.3 y 0.5. El suelo desnudo o con escasa vegetación presenta valores cercanos a cero. Los valores negativos, generalmente se asocian a presencia de agua, nubes, entre otros.

La leyenda, que se visualiza al pie de la figura 10, permite asociar los valores del índice verde con los colores, a los fines de comparar la vigorosidad de la cobertura vegetal dentro del lote y/o monitorearla a lo largo del tiempo.

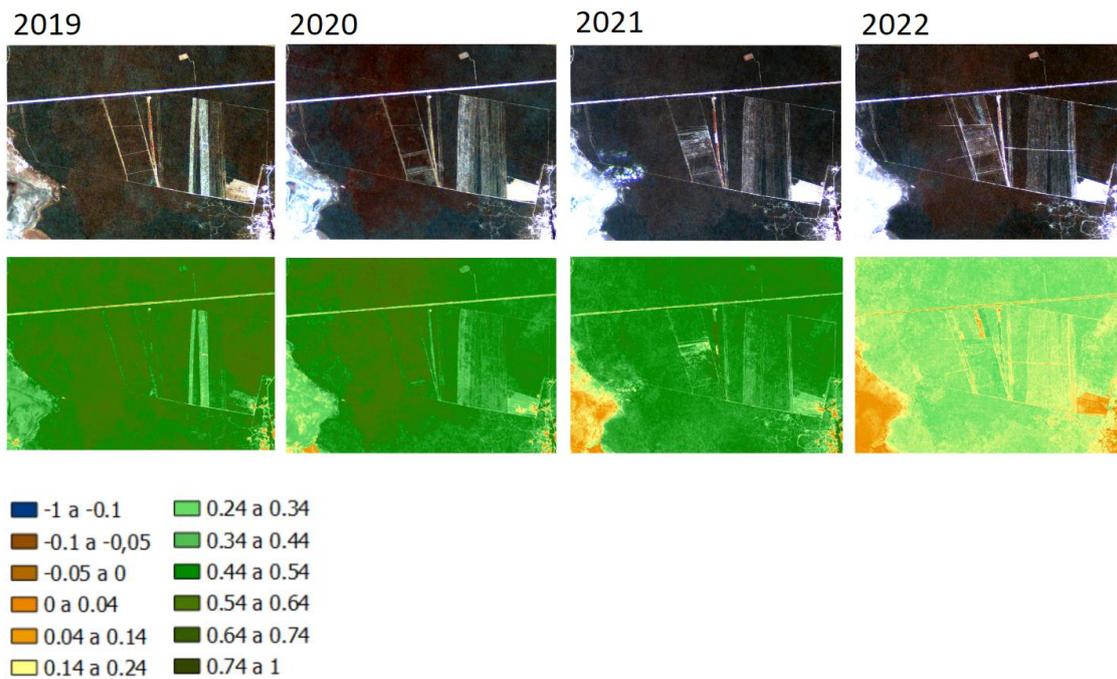


Figura 7: Imágenes Sentinel 2 y productos NDVI del área de estudio, mes de marzo de 2019 a 2022.

A los efectos de poder cuantificar los cambios de la cobertura vegetal en el lote experimental, se hizo una comparación de la dinámica del índice verde, con respecto al lote colindante al oeste (en estado natural o seminatural, sin perturbación mecánica), entre los meses de septiembre de 2016 y marzo de 2023. El lote experimental se identifica como lote “1” y el lote colindante, como lote “2” (Figura 8). El procesamiento de las imágenes se realizó a través de un script desarrollado ad hoc en la plataforma de procesamiento en la nube Google Earth Engine.

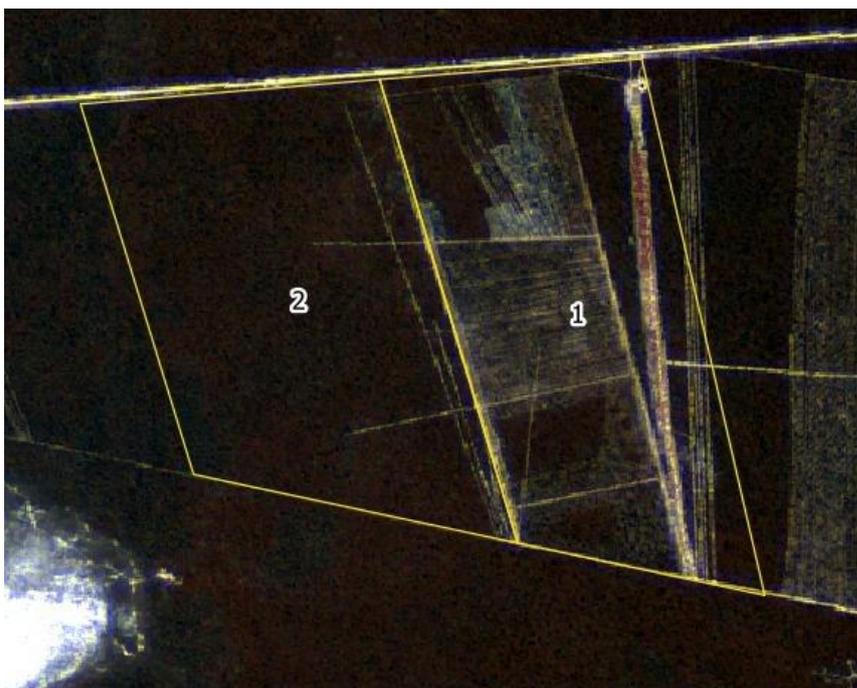


Figura 8: Ubicación del lote experimental “1” y su colindante “2” superpuesto a imagen Sentinel 2 del 17 de abril de 2022.

Para cada una de las imágenes libres de nubes, disponibles en el período de análisis, se calcularon los valores medios de NDVI, para ambos lotes (Figura 9). El índice verde del lote rolado copia la variación del lote colindante sin rolar, esto sugiere que el rolado no modifica sustancialmente la cobertura vegetal. Se puede observar que el índice verde de ambos lotes, alcanza sus valores máximos entre los meses diciembre y mayo y los valores más bajos en los meses de agosto a octubre, de acuerdo al régimen de las precipitaciones de cada año (véase Figura 3). Además, se observa una tendencia decreciente del NDVI en ambos lotes, producto de la sequía que ocurrió en los últimos años.

La diferencia de los índices verdes entre ambos lotes fue variable a lo largo del tiempo, registrándose las diferencias mayores en porcentajes en las fechas 9/09/2021, 14/09/2021, 24/10/2021, 18/10/2021 y 27/01/2023 con valores de 20.46, 20.23, 20.72, 20.12, 20.39 respectivamente. Estas diferencias ocurren principalmente en los meses de setiembre y octubre, momento en que la vegetación está seca, los pastos reducen al mínimo su contenido de humedad, los arbustos han perdido sus hojas y es el momento de finalización del pastoreo.

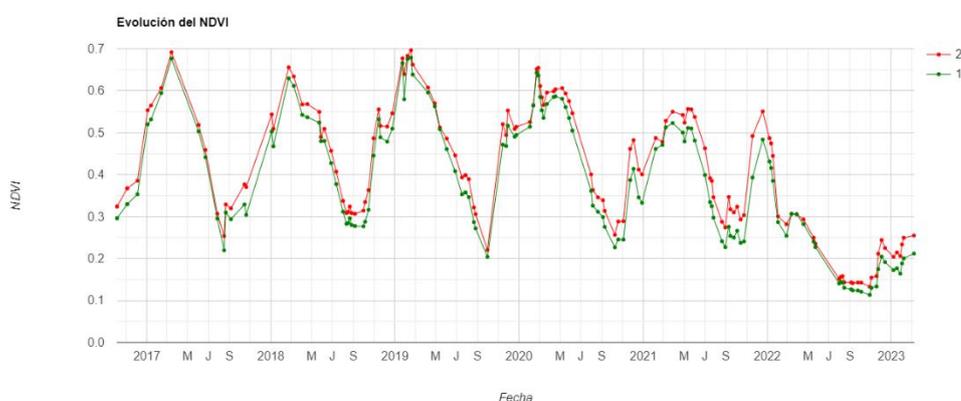


Figura 9: NDVI medio de los lotes Experimental (1) en verde y lote colindante (2) en rojo, en el período septiembre 2016 a marzo de 2023.

Conclusiones

El NDVI está fuertemente correlacionado con las precipitaciones, dado que es uno de los factores ambientales que influyen en la vigorosidad de las plantas. Este estudio muestra la tendencia negativa a lo largo de los años producto de las condiciones de sequía.

El monitoreo del NDVI a través de series temporales permite identificar cambios en la vegetación a lo largo del tiempo, lo que puede ser útil para detectar tendencias de crecimiento, variaciones estacionales, efectos del clima y otros factores ambientales. Asimismo, es posible identificar patrones dentro del lote, que luego de una evaluación *in situ*, permita realizar un manejo diferenciado en función del estado de la vegetación. La similitud de los valores de NDVI en el lote rolado y en el lote continuo sin rolar, evaluados durante el mismo período permite inferir que la perturbación fue moderada y no generó cambios profundos en la vegetación.

Capítulo 3: Determinación de sitios ecológicos: metodología y los resultados

Concepto de sitio ecológico

En este estudio, se utilizó el concepto de sitio ecológico para la sectorización de área de trabajo, su caracterización ambiental y posterior producción de recomendaciones de manejo. El sitio ecológico se define como un sector o porción del establecimiento, para una escala cartográfica establecida, con características climáticas, geomorfológicas y edáficas homogéneas que se diferencia de otras porciones o sectores en: (i) la producción, composición y dinámica de la vegetación bajo un régimen de disturbio natural o de condiciones de referencia históricas, y (ii) presenta similares respuestas al manejo y los procesos de degradación y restauración/rehabilitación.

En otras palabras, los sitios ecológicos son áreas homogéneas en cuanto a la posición topográfica y tipo de suelos, lo cual configura un potencial para el desarrollo de determinados tipos de vegetación, incluidas las especies forrajeras, nativas o implantadas. La sectorización del predio en sitios ecológicos permite planificar con mayor precisión las prácticas ganaderas a aplicar (por ejemplo, tipos de rolados, siembra de pasturas, pastoreo, etc.) y predecir el impacto de los cambios.

En la provincia de Santiago del Estero, a escala de detalle y semidetalle (1:20.000 – 1:50.000), hay tres sitios ecológicos característicos definidos por el gradiente de la topografía local: altos, medias lomas y bajos. Los altos se ubican en las posiciones elevadas del terreno, y originalmente albergaron bosques altos (quebrachales). Los bajos se ubican en las posiciones más bajas del terreno, sosteniendo pastizales/sabanas productivas para la ganadería. Las medias lomas se ubican en las posiciones intermedias del terreno, y originalmente representaron una transición en los sitios ecológicos anteriores, formando bosques abiertos (árboles aislados y pastizales por debajo). La sobre explotación ganadera y forestal ha alterado este paisaje original, dando lugar a arbustales y bosques bajos y áreas erosionadas en cualquiera de los sitios ecológicos anteriores (Figura 10).

La Guía de Sistemas Silvopastoriles de Santiago del Estero indica que cada sitio ecológico tiene aptitudes ambientales y productivas diferentes. Por ello, para planificar o ajustar el manejo silvopastoril, es recomendable basar las decisiones en el mapeo y caracterización de los sitios ecológicos del predio productivo. A su vez, esta caracterización debe incluir una valoración del grado de conservación de la vegetación nativa, es decir los estados de la vegetación y del suelo. En este contexto, el estado de la vegetación refiere la condición del pastizal y del estrato arbustivo y la estructura arbórea.

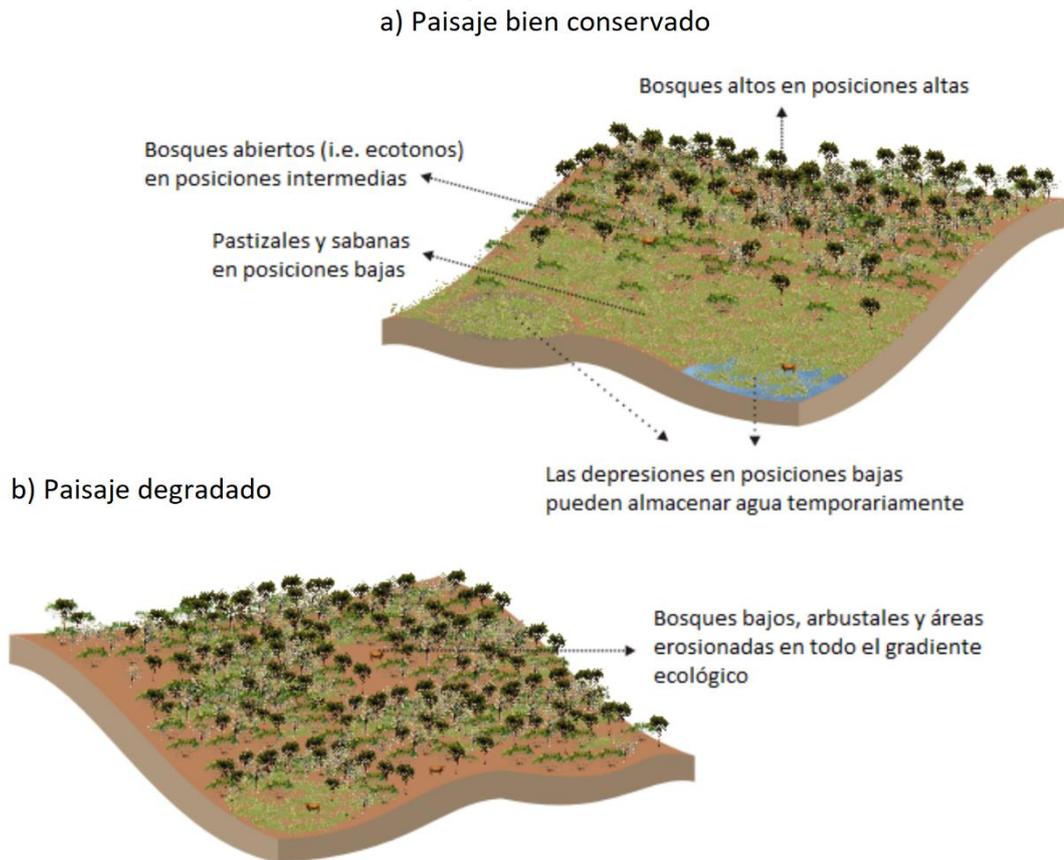


Figura 10: a) Sitio ecológico altos, medias lomas y bajos en buen estado de conservación. b) Los mismos sitios ecológicos anteriores degradados por sobrepastoreo y sobre explotación forestal.

Metodología

La determinación y mapeo de los sitios ecológicos del lote se basó en un análisis topográfico del terreno, discriminando las áreas bajas, altas y medias lomas. La metodología seguida fue:

1. Análisis de un Modelo Digital de Elevaciones (SRTM 30m resolución), descargado del servidor EarthExplorer, del Servicio Geológico de los EEUU. Los procesamientos se realizaron con el Software GRASS GIS 7.6.0. El modelo fue corregido a cotas absolutas utilizando la Red de Nivelación Oficial de la República Argentina, obtenida desde la página Web del Instituto Geográfico Nacional.
2. Clasificación de los sitios ecológicos utilizando el modulo r.geomorphon de GRASS GIS 7.6.0, el cual clasifica las formas del terreno.
3. Una visita de campo para corroborar lo observado en el Modelo Digital del Terreno (MDT) y las imágenes satelitales.

Coberturas vegetales

Luego de haber determinado los sitios ecológicos, se procedió a clasificar las principales fisionomías vegetales (es decir, el aspecto de la vegetación) presentes en el lote, lo que fue plasmado en mapas. Se aplicó el siguiente proceso:

1. Se descargó una imagen SENTINEL2 del 1/08/2018.
2. Se seleccionaron las bandas 2, 3, 4, 8 y 11, correspondientes al azul, verde, rojo, visible, infrarrojo cercano y onda corta infrarroja para obtener la mejor diferenciación espectral de la cobertura vegetal.
3. Se aplicó una clasificación no supervisada de la imagen seleccionada. La anterior se define como un proceso de agrupación de píxeles con valores digitales similares para todas las bandas y cada una de estas agrupaciones son llamadas clases espectrales, las cuales se supone corresponden a un tipo de cubierta de terreno. Se utilizó como algoritmo de agrupamiento el método ISODATA (Datos auto-asociados iterativamente).
4. En base a la interpretación visual de la imagen, tanto en combinación falso color, como en colores reales, se definió el algoritmo para generar 8 clases espectrales. Se hizo un primer análisis de los resultados y se asignó una categoría preliminar a las clases fisionómicas vegetales presentes en el área de trabajo.
5. La información generada fue importada en la aplicación móvil Cartodroid, y se realizó una verificación a campo preliminar con el fin de identificar diferencias de relieve, suelos y vegetación. Se geo-posicionaron y describieron puntos contenidos en las diferentes clases espectrales y se tomaron fotografías en el lugar. En total, se verificaron 26 puntos a campo.

Resultados

La clasificación de sitios ecológicos obtenida se presenta en la Figura 14, se aprecia que las clases obtenidas se corresponden con las áreas bajas y elevadas del modelo topográfico 3D del lote.

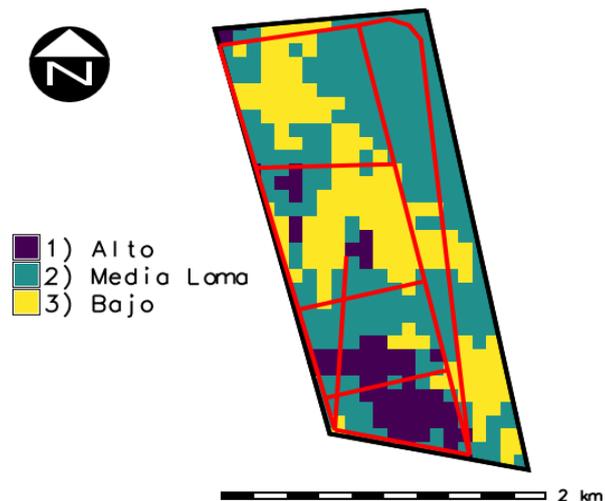
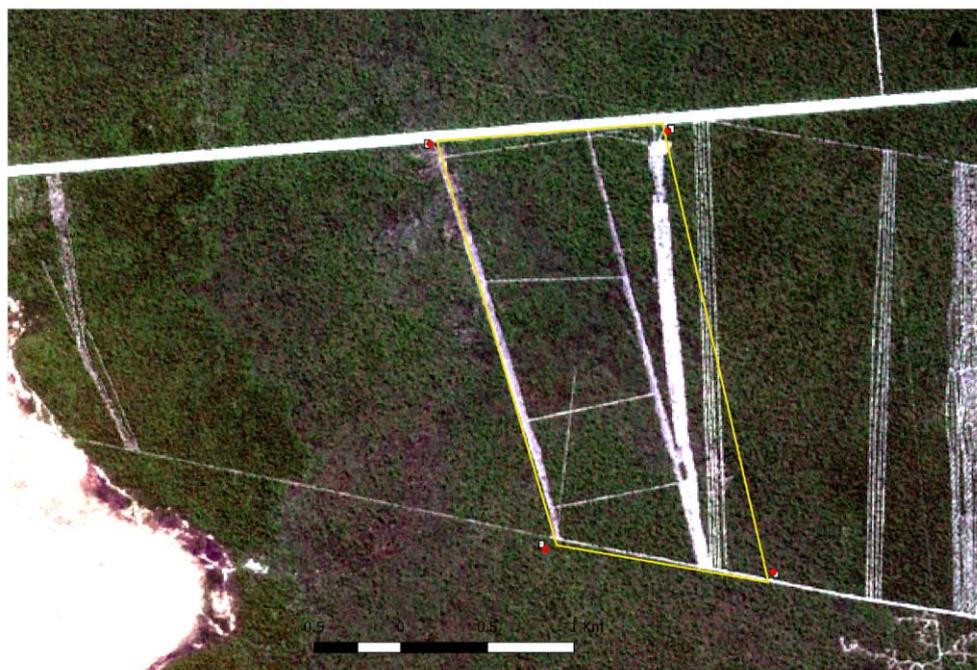


Figura 11: Mapa de sitios ecológicos del lote de 350 ha ubicado en el Dpto. Figueroa. Se indican también las picadas internas del lugar en color rojo.

En la imagen satelital en color verdadero a simple vista se aprecian diferencias en los tipos de coberturas, discriminándose las áreas más arboladas en una textura más gruesa y de color verde oscuro, y los arbustales, con texturas más suaves y de colores mayormente más oscuros (Fig. 12, arriba).



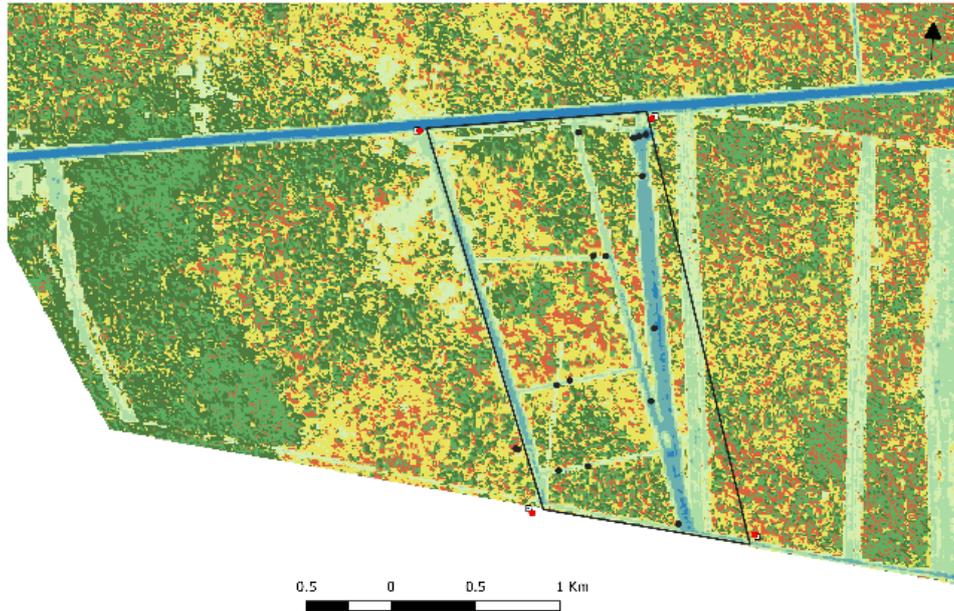


Figura 12: Imagen satelital en colores reales (arriba). Imagen clasificada en 8 clases, los puntos negros muestran los puntos de observación a campo (abajo).

La clasificación no supervisada realizada y el correspondiente relevamiento a campo de cada clase indica la presencia de tres clases significativas:

- **Clase verde:** son áreas de lomadas y planos elevados, siempre en un contexto de topografía suave, con vegetación de arbustal-bosque bajo, con árboles emergentes. Esta clase corresponde a los sitios ecológicos altos y medias lomas.

- **Clase amarilla:** corresponde a áreas dominadas por arbustales, casi desprovistas de árboles emergentes, esencialmente en sitios ecológicos bajos.

- **Clase roja:** como la clase anterior, son también arbustales en sitios ecológicos bajos, pero a diferencia de la clase anterior, estos arbustales se ubican mayormente sobre depresiones finales o coinciden con las líneas de escurrimientos del agua de lluvia. Al parecer están dominados por vegetación adaptada a suelos salinos, lo cual indica mayores restricciones por salinidad del suelo.

Conclusiones

Los sitios ecológicos identificados mediante imagen satelital y posterior corroboración a campo son alto, media loma y bajo. Estos sitios si bien comparten algunos elementos florísticos, presentan características diferenciales de vegetación y suelos, como se verá más adelante.

Capítulo 4: Rolado

El Rolado Selectivo de Baja Intensidad (RBI) es una propuesta tecnológica de INTA, que permite disminuir la cobertura de arbustos, sin modificar profundamente la comunidad leñosa presente y generar un ambiente de media sombra amigable y beneficioso para la producción ganadera. El RBI se basa en el empleo de un tractor y un rolo, que facilita la germinación de pastos nativos y permite la siembra de especies introducidas para incrementar la oferta de forraje necesaria para una actividad ganadera rentable. El RBI tiene el propósito explícito de mantener viable la(s) población(es) de especies leñosas de interés para aprovechamiento ganadero y forestal, es decir desarrolla un sistema silvopastoril. Como toda práctica agropecuaria y forestal, el RBI requiere de una planificación para regular la intensidad, severidad y frecuencia su aplicación a lo largo del tiempo. La intensidad del rolado se define en función de la vegetación presente, del peso de la maquinaria, del peso y ancho del rolo, del número y disposición de las cuchillas, de la posición de la pala frontal y de las veces que pasa el rolo sobre el mismo lugar. Más detalles sobre esta práctica consultar el Manual INTA ‘Rolado Selectivo de Baja Intensidad’: <http://inta.gob.ar/documentos/rbi-roladoselectivo-de-baja-intensidad/>

La maquinaria

En la primera etapa del rolado se utilizó un pequeño rolito con el que contaba el establecimiento, al cual se le tuvo que realizar una adaptación agregándole peso ya que era muy liviano y no lograba cortar los arbustos (Fig. 13). El rolo es una herramienta que mecaniza el proceso de remoción o perturbación de leñosas. El rolo consiste en un cilindro de metal de diámetro 1-1,2 m y ancho variable (2,5 m a 4 m) con cuchillas soldadas en su periferia. En este trabajo se utilizó un rolo de un ancho de 2,5 m, que permite una buena maniobrabilidad, respeta la estructura de tamaños de las leñosas valiosas y mejora el hábitat de fauna. Las cuchillas del rolo reemplazan el efecto de corte o golpe ejercido por el hacha o el machete. El cilindro es hueco, pero puede lastrarse con agua para aumentar su peso y aumentar el efecto de corte.





Figura 13: Rolos y tractor utilizados por el productor, tractor con rolo pequeño (primera foto); rolo pequeño con agregado de peso (segunda foto) para favorecer el corte de la leñosa; tractor y rolo de 2,5m usado en los lotes de media loma y bajo (tercera y cuarta foto).

El rolo aplasta y corta la parte aérea de las plantas cerca de la superficie del suelo. Es decir, produce un efecto de poda basal, pero la corona y raíces siguen vivas y es desde allí donde regeneran su estructura aérea. La remoción del aparato fotosintético obliga a la planta a usar la energía almacenada en los órganos subterráneos. La capacidad de rebrotar de las especies leñosas depende directamente de las reservas energéticas de la planta y de las condiciones de crecimiento posteriores a la intervención, especialmente disponibilidad hídrica y pastoreo. Una alta frecuencia de perturbaciones (ej.: rolados y quemas anuales) induce el cambio de hábito de crecimiento y la formación de numerosos tallos, por lo tanto, ramas y follaje resultando en una estructura vegetativa con mayor volumen y biomasa que el que tenía de la planta antes de ser intervenida.

El rolo no mata al arbusto, en muchos casos favorece el establecimiento de nuevos individuos incrementando su densidad y afectando la accesibilidad forrajera. Por estos motivos su efectividad para controlar el estrato arbustivo a largo plazo ha sido cuestionada. No obstante, el rolado permite la implantación de pasturas y recuperación de pastos nativos conservando individuos seleccionados (dependiendo de la intensidad del rolado), constituyendo así, una herramienta muy valiosa en términos de diseño del paisaje. En la siguiente figura se observa que las cuchillas no pudieron cortar correctamente la leñosa volteada por el equipo, debido principalmente a una falta de peso en el cuerpo del rolo y falta de cuchillas afiladas. Además, otra desventaja del rolado es su limitada capacidad de selección de leñosas debido a su tamaño y agilidad.



Figura 14: leñosa arbustiva que no fue trozada correctamente por el rolo.

Entrenamiento a tractorista

Para desarrollar un sistema silvopastoril que cumpla con el mantenimiento de las especies forestales de importancia económica y ecológica es muy importante el trabajo del tractorista. Muchos tractoristas provienen del trabajo en sectores agrícolas entonces el trabajo en el monte suele ser dificultoso ya que la visibilidad desde la cabina del tractor es escasa. Previo al rolado se debe caminar el lote y observar cuales son las especies que se deben conservar y diseñar correctamente el rolado, además esta inspección previa sirve para detectar pozos, grietas profundas u otras situaciones que puedan representar un problema para el tránsito del tractor y así evitar/reducir las rupturas. En este establecimiento se realizan picadas que sirven como guía al tractorista.

Se realizó un entrenamiento al tractorista del establecimiento indicándole las pautas fundamentales para la aplicación de un RBI de manera correcta.



Figura 15: Capacitación a tractoristas (arriba). Visibilidad desde la cabina del tractor (abajo).

Capítulo 5: Evaluación y manejo de suelos

Metodología

Para los sitios ecológicos alto y bajo se determinó COT (carbono orgánico total), Nt (nitrógeno total), Pex (Fósforo extraíble), Ce (Conductividad eléctrica) y DAP (densidad aparente). La metodología utilizada en las determinaciones fue:

- COT = oxidación húmeda, técnica de Walkley y Black, (1934) modificada a escala semi-micro por Norma IRAM- SAGPyA 29571-2 (2009). El COT es utilizado para estimar otro parámetro que es la Materia Orgánica del Suelo (MOS), esta última, es un indicador de la calidad actual que presenta el mismo. Para ello, se multiplica el valor de COT por el factor 1,73 resultante de considerar que la MOS tiene un 56 % de carbono. Suelos con más de 3% MOS se consideran bien provistos.
- DAP= Blake & Hartge, 1986; Campbell & Henshall, 1991.
- Ce: Conductividad eléctrica del extracto de saturación (método SAMLA).
- NT = Digestión y destilación por método Kjeldhal (IRAM – SAGPyA 29572-1 y 29572-2).
- Pex: fósforo extraíble por metodología de Olsen.

Sobre cada uno de estos sitios se trazaron 3 transectas de 100 m lineales de extensión sobre las cuales se recolectaron muestras de suelo “simples” y “compuestas”. Muestras “simples”: constan de 1 muestra por cada transecta y por cada profundidad evaluada. Las muestras “simples” recolectadas en cada transecta fueron:

- Para la determinación de densidad aparente a los 0-15 cm, 15-30 cm y 30-60 cm de profundidad. Con la finalidad de calcular el stock de los nutrientes ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) evaluados y monitorear el estado poroso del suelo.
- Para la definición de textura en las profundidades de 0-15 cm, 15-30 cm y 33-60 cm. Esta variable permite interpretar y explicar el comportamiento de varios indicadores de calidad de suelo y su comportamiento en el tiempo.

Muestras “compuestas”: constan de 1 muestra por cada transecta, dicha muestra está compuesta por 4 submuestras que fueron extraídas cada 25 metros dentro de cada transecta. Este tipo de muestras fueron recolectadas con el fin de obtener los datos de COT, Nt, Pex y Ce en las profundidades de 0-15 cm, 15-30 cm y 30-60 cm. Se utilizaron estas profundidades para cubrir los primeros 60 cm de profundidad, donde se desarrolla y acumula la mayor parte de la masa radicular y hacer el estudio comparable con otros estudios realizados.

La recolección de muestras a campo se realizó en tres momentos:

Año 1: define la línea de base del estudio y se llevó a cabo en el período invernal del año 2019 previo a la realización de la práctica de rolado y pastoreo de los lotes.

Año 2: se realizó en el periodo invernal del año 2021:

- En el sitio alto ya había transcurrido un año y medio de rolado. El sitio en evaluación, se encontraba en un estado de baja cobertura herbácea, producto del sobrepastoreo y consecuencia de una prolongada sequía.
- El sitio Bajo aún no había sido rolando y su cobertura herbácea era baja debido a la alta densidad de arbustos presentes que limita la productividad y por consiguiente baja o nula capacidad forrajera del sitio

Año 3: se realizó en el periodo invernal del año 2022. Los potreros fueron clausurados en la primavera-verano de manera de acumular forraje para el invierno.

Los valores de Cot, Nt, Pe y DAP se evaluaron mediante análisis de la varianza, utilizando el programa estadístico InfoStat. En este, se compararon los efectos acumulados del manejo realizado durante los distintos años de evaluación, en cada sitio ecológico y para cada una de las profundidades estudiadas. Para la comparación entre las medias de cada año se utilizó Test de Tukey (p-valor<0,05)

Resultados

1. *Carbono orgánico total, nitrógeno total y fósforo extraíble*

Se realizó un análisis global de las variables COT, Nt, Pex y DAP entre los años de evaluación, para cada capa de suelo y sitio estudiado (Tabla 1 y 2). En dicho análisis se observa que no existen diferencias estadísticas entre los años estudiados para cada variable en las distintas profundidades y sitios, con excepción de la DAP quien registra diferencias entre años en el sitio Alto de la primera profundidad.

Tabla 1: Análisis de la varianza entre los años estudiados, de las distintas propiedades de suelo analizadas del “sitio Alto” en cada una de las tres capas relevadas

VARIABLE	Sitio Alto					
	profundidad 0-15 cm		profundidad 15-30 cm		profundidad 30-60 cm	
	F	p-valor	F	p-valor	F	p-valor
COT (%)	0,05	0,9485	2,08	0,2061	1,11	0,3877
NT (%)	1,58	0,2817	3,48	0,0994	0,86	0,4687
Pex(ppm)	0,89	0,4582	1,2	0,3634	1,16	0,3754
dap (g/cm3)	4,79	0,057*	0,01	0,9858	0,57	0,5944

p-valor < 0,05: diferencias estadísticas significativas (*); COT: carbono orgánico total; NT: nitrógeno total; Pex: fosforo extractable; dap: densidad aparente

Tabla 2: Análisis de la varianza entre los años estudiados, de las distintas propiedades de suelo analizadas del “sitio Bajo” en cada una de las tres capas relevadas.

VARIABLE	Sitio Bajo					
	profundidad 0-15 cm		profundidad 15-30 cm		profundidad 30-60 cm	
	F	p-valor	F	p-valor	F	p-valor
COT (%)	1,09	0,395	0,75	0,512	0	>0,9999
NT (%)	2,85	0,1349	4,45	0,068	5,2	0,0647
Pex(ppm)	3,11	0,1181	11,38	0,0408	10,58	0,0108
dap (g/cm3)	3,83	0,0849	2,73	0,1438	0,54	0,6094

p-valor < 0,05: diferencias estadísticas significativas (*); COT: carbono orgánico total; NT: nitrógeno total; Pex: fosforo extractable; dap: densidad aparente

Al hacer un análisis más detallado de la dinámica de las variables presentadas en la tabla 1 y 2 encontramos lo siguiente:

1.1 Carbono Orgánico Total (COT)

El COT es utilizado para estimar otro parámetro del suelo que es la Materia Orgánica del Suelo (MOS), esta última, es un indicador de la calidad actual que presenta el suelo. Para ello, multiplicamos el valor de COT por el factor 1,73 resultante de considerar que la MOS tiene un 56 % de carbono. Suelos con más de 3% MOS se consideran bien provistos. Los valores de COT recolectados tanto en el Sitio Bajo como Alto, se encuentran dentro de estándares normales para sitios prístinos (es decir sin intervención mecánica, solo pastoreo aislado) de la región evaluada. Es importante reconocer que estos sitios se encuentran en condiciones de cobertura que permiten conservar en el tiempo dichos valores deseables de materia orgánica del suelo (MOS). En este sentido, en los años evaluados, el Sitio Alto mostró un valor medio de MOS en los primeros 15 cm del 2,43%, mientras que entre los 15 y 30 cm la MOS promedio fue de 1,46 % y 0,69% entre los 30 y 60 cm. Cabe aclarar, que en ninguna de las profundidades antes mencionadas se registraron diferencias significativas entre años (Tabla 1). Sin embargo y sólo evaluando los primeros 30 cm podemos ver que el rolado sumado al pastoreo/clausura del sitio Alto, generaron una tendencia a incrementar los valores de COT a lo largo del periodo evaluado (Figura 16).

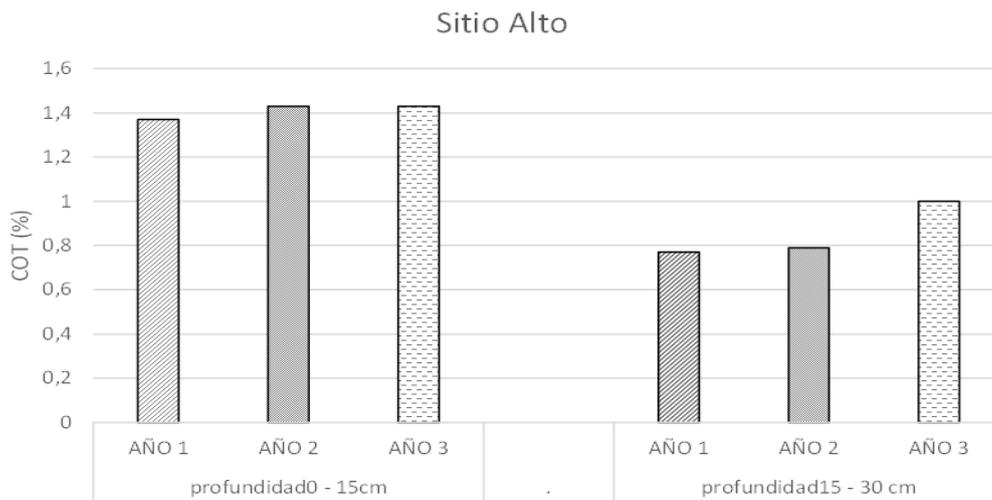


Figura 16: Niveles de COT (%) para cada uno de los años estudiados (1: 2019, 2; 2021 y 3: 2022) en la capa de suelo de 0-15 y 15-30 cm del sitio Alto.

Por su parte, para los años aquí evaluados, el Sitio Bajo mostró un valor medio de MOS en los primeros 15 cm de 2,4%, mientras que entre los 15 y 30 cm este valor fue de 1,42% y 0,52% entre 30 y 60 cm de profundidad. En ninguna de las profundidades se registraron diferencias estadísticas significativas entre los años (Tabla 2). Sin embargo, al analizar los valores de COT durante los años bajo estudio y en las dos primeras profundidades, observamos que el rolado sumado al pastoreo/clausura, generaron una tendencia a reducir los % COT (Figura 17). Este comportamiento difiere del sitio anterior, y dicha diferencia se podría asociar a la presencia de residuos menos recalcitrantes (con mayor relación C/N) y al momento de aplicación del tratamiento de rolado y posterior sobrepastoreo. Por lo antes mencionado, cabe aclarar que los sitios ecológicos “Bajos” fueron los últimos en ser rolados. Además, estos sectores se relacionan con la presencia de mayor cantidad de pastizales y vegetación arbustiva. La intervención de rolado sobre el estrato arbustivo fue más intensa en el bajo que en el alto (capítulo 7). Los residuos leñosos principalmente arbustivos, presentan ligninas y taninos, característica que puede haber influenciado el contenido de C en el suelo. De esta forma y haciendo referencia a lo hasta aquí presentado, el sitio ecológico Bajo debería tener un manejo de uso del suelo distinto al Sitio Alto, donde se preste atención al mantenimiento de la cobertura del suelo (por vegetación viva o muerta) y potenciando la incorporación de residuos orgánicos.

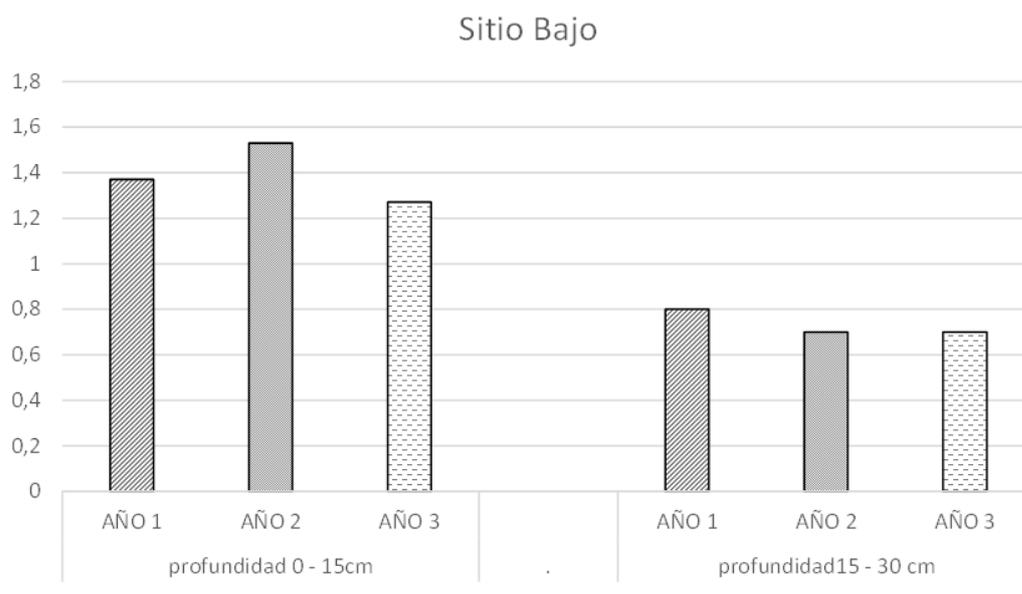


Figura 17: Niveles de COT (%) para cada uno de los años estudiados (1: 2019, 2; 2021 y 3: 2022) en la capa de suelo de 0-15 y 15-30 cm del sitio Bajo

En ambos sitios, se observó una estratificación del COT en profundidad, lo cual es característico de suelos con una reducida historia agrícola. Por otro lado, se encontró una tendencia a aumentar los valores de COT con el paso de los años, en los dos primeros estratos. Este fenómeno estaría relacionado con la iniciación del proceso de habilitación agropecuaria, en conjunto con la dinámica de deposición y degradación del material leñoso remanente del proceso de rolado. Los restos de ramas y material vegetal trozados por el paso del rolo son incorporados en los primeros 10 cm de profundidad del suelo. Dicha incorporación, junto con el movimiento del suelo producto de las cuchillas del rolo, acrecientan la oxigenación de los primeros cm. e incorporan materiales de distinta relación carbono/nitrógeno (C/N) acrecentando así los procesos de degradación y mineralización.

1.2 Nitrógeno Total (NT)

El Nitrógeno (NT) es uno de los principales nutrientes para los vegetales. En ambientes semiáridos, es el segundo factor condicionante para los sistemas productivos después del agua en el suelo. El valor de NT, no indica ni se relaciona con la disponibilidad de N para las raíces y microbiota del suelo. Sólo nos da una referencia de reserva de N que tiene este suelo a la profundidad muestreada.

Con bases a los datos relevados en este estudio, se observa que el valor promedio de Nt de los años evaluados para cada una de las profundidades, se encuentran dentro de una relación (C/N) de 9 a 1 (considerado normal para horizontes minerales). El contenido de Nt promedio de los tres años estudiados, entre los 0 y 15 cm y 15 y 30 cm de profundidad fueron, 0,13% y 0,09% respectivamente en el Sitio Alto, mientras que en el

Sitio Bajo fue de 0,12% y 0,08% respectivamente. Los valores aquí expuestos son normales para este tipo y uso del suelo y no debería ser una limitante para el normal crecimiento de cultivos agrícolas.

Por otro lado, se puede observar que los valores de Nt siguen una estratificación similar a la encontrada en el COT. Y al igual que lo sucedido con el COT, el Nt no muestra diferencias significativas entre los años evaluados para los sitios bajo estudio y estratos de suelo relevados (Tabla 1 y 2), indicando que no hubo cambios significativos posterior a la intervención.

1.3 Fosforo Extraíble (Pex)

El Pex es un macronutriente importante para el crecimiento radicular y calidad de frutos en numerosas especies vegetales, también tiene funciones fisiológicas claves en el desarrollo de las plantas. Esta forma química de P no tiene relación con la reserva de P total que para Santiago del Estero al igual que en otras regiones de la pampa semiárida argentina, es de aproximadamente 550-650 ppm en los primeros 20 cm (Sánchez M. 2022 comunicación personal). El Pex es altamente dependiente del pH del suelo y de la historia de uso del sitio. está identificado como P Olsen (año) en el informe del laboratorio (anexo 1), ya que para muestras con pH 7 o superiores se recomienda este método de determinación. Utilizando el método antes indicado, se considera como valor crítico 10 ppm (partes por millón = mg/kg ó g/T).

En el caso de las muestras analizadas, el Pex no muestra diferencias entre los años estudiados en los sitios y estratos de suelos de evaluación (Tabla 1 y 2). En el Sitio Alto, esta variable logra un valor medio en los años estudiados de 9,2 ppm para los 0 a 15 cm, 5,6 ppm entre los 15 a 30 cm y 3,4 ppm 30 a 60 cm. Por otro lado, en el Sitio Bajo los niveles de este nutriente fueron de 10,1 ppm en los primeros 15 cm, 7,2 ppm entre 15 a 30 cm y 5,3 ppm en el estrato de 30 a 60 cm. Se observa entonces, que en todos los casos las concentraciones de este indicador están próximas o por debajo del valor crítico antes mencionado. Esto implicaría una insuficiencia del nutriente afectando la potencialidad agrícola de estos suelos.

2. Densidad aparente (*dap*)

La buena calidad física del suelo determina un ambiente adecuado para el desarrollo de las raíces vegetales, como así también un ingreso y almacenamiento óptimo del agua de lluvia. Uno de los indicadores más comunes para conocer el estado físico de un suelo es la densidad aparente.

La densidad aparente se define como la masa de suelo seco a 105 °C por unidad de volumen (g. cm^{-3} o t. m^{-3}). Describe la densificación del suelo, representando la relación entre sólidos y espacio poroso. Es usada para convertir datos que se expresan en concentraciones y pasarlos a masa o volumen. Estos cálculos son muy utilizados en fertilidad y fertilización de cultivos extensivos (en este informe no se acudió a esta

conversión debido a que la dap no mostró diferencias entre sitios). La densidad aparente varía con la textura y estructura del suelo y el contenido de materia orgánica; También puede variar estacionalmente, fluctuar por efecto de labranzas y el contenido de humedad del suelo sobre todo en los suelos con arcillas expandentes.

En el estudio aquí realizado, solo se encontraron diferencias de dap entre años, en la primera profundidad del Sitio Alto (Tabla 1 y 2). En línea con esto, las diferencias se registraron entre el primer muestreo 1,04 g/cm³ (sin rolar) y el último muestreo en el que se registró un valor de 1,18 g/cm³ (sitio con 3 años de rolado y pastoreo). Las diferencias hasta aquí registradas se relacionarían directamente con el manejo del sitio. Cabe aclarar que el Sitio Alto, fue el primero en ser habilitado mediante RBI. Esto, sumado al sobrepastoreo sufrido en el segundo año de producción, serían los factores determinantes que explicarían gran parte del incremento de la dap.

Como era de esperar, los valores más bajos de esta variable, fueron encontrados en cercanías a la superficie del suelo (0 a 15 cm. del Sitio Bajo 1,1 g/cm³ y en el Sitio Alto 1,08 g/cm³) y los más altos en la última profundidad estudiada (30 a 60 cm. del Sitio Bajo 1,11 g/cm³ y en el Sitio Alto 1,11 g/cm³). Para cada uno de los sitios la dap guardó una estrecha relación con la textura de cada uno de los sitios, y no hay evidencias de densificación en los perfiles (Tabla 3) considerando que un umbral crítico para el crecimiento de las raíces es de 1,43 g/cm³ para estas texturas. Por el contrario, todos los sitios y profundidades evaluadas muestran una densidad aparente normal para las texturas de estos suelos, tal vez como resultado de la gran cantidad y estratificación de raíces, materia orgánica y organismos vivos que se desarrollan en este suelo de monte.

Tabla 3: proporciones relativas de las partículas de los suelos evaluados (% Arena, % Arcilla y % Limo), la clasificación en una clase textural, rango teórico de dap en base a la clase textura y la dap promedio registrada para cada sitio y cada profundidad

sitio	profundidad	Ar%	Li%	Arc. %	clase textural	rango teorico de dap según textura	dap promedio registrada
Alto	0 a 15	23,5	47,5	29	Franco Arcillosa	1,10 a 1,25	1,04
Alto	15 a 33	27,5	43,5	29	Franco Arcillosa	1,10 a 1,25	1,07
Alto	33 a 66	27,5	42,5	30	Franco Arcillosa	1,10 a 1,25	1,14
Media Loma	0 a 15	24	52,5	23,5	Franco Limosa	1,10 a 1,25	1,09
Media Loma	15 a 33	30	45	25	Franco Limosa	1,10 a 1,25	1,09
Media Loma	33 a 66	31	40	29	Franco Arcillosa	1,10 a 1,25	1,15
Bajo	0 a 15	25	43,5	31,5	Franco Arcillosa	1,10 a 1,25	1,04
Bajo	15 a 33	28,5	43,5	28	Franco Arcillosa	1,10 a 1,25	1,03
Bajo	33 a 66	25	41,5	33,5	Franco Arcillosa	1,10 a 1,25	1,11

% de arena (% Ar); % Limo (Li %); % Arcilla (Arc%);

3. Conductividad Eléctrica (Ce)

La conductividad eléctrica; es un parámetro muy dinámico en el tiempo y el espacio, con un alto coeficiente de variación dentro de un mismo sitio. Estima la concentración de sales más solubles que el yeso en la muestra de suelo, lo que convierte a esta variable en un indicador del nivel de salinidad de un suelo. En este caso, el método de evaluación utilizado fue el de Ce en el extracto de saturación. El valor crítico de Ce para la mayoría de las especies agrícolas es 4 dS/m (en extracto de saturación).

Como se puede observar en la tabla 4, la Ce muestra diferencias estadísticas en las primeras 2 profundidades del sitio Bajo y en las mayores profundidades del sitio Alto. En base a las diferencias estadísticamente aquí encontradas se presenta a continuación el comportamiento de la Ce entre los años para cada profundidad del Sitio Alto (Figura 18) y Sitio Bajo (Figura 19).

Tabla 4: Resultados de ANVA de la Ce (dS/m), entre los distintos años bajo estudio en cada una de las profundidades y sitios evaluados.

Sitio	CE (ds/m)					
	profundidad 0-15 cm		profundidad 15-30 cm		profundidad 30-60 cm	
	F	p-valor	F	p-valor	F	p-valor
Alto	1,04	0,4082	27,34	0,001*	5,77	0,04*
Bajo	13,73	0,0058*	6,21	0,0345*	3,47	0,0997

p-valor < 0,05: diferencias estadísticas significativas (*); Ce: conductividad eléctrica

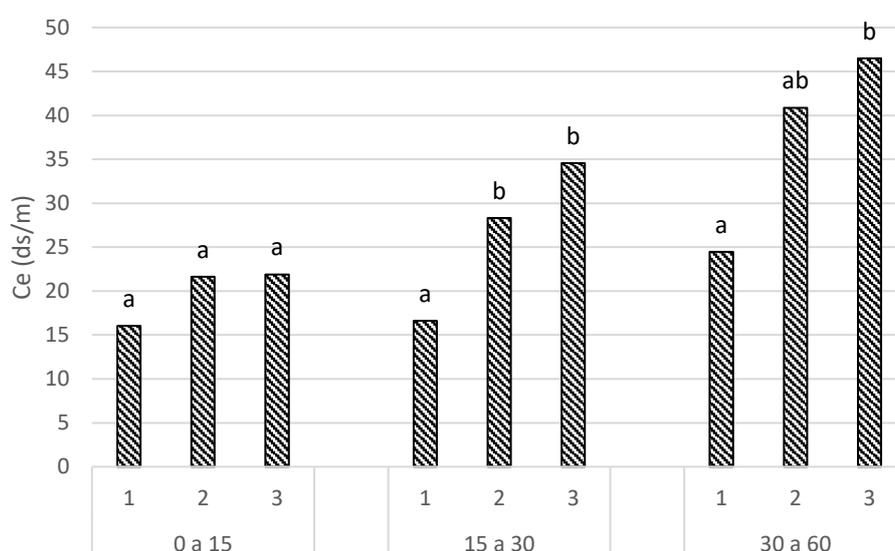


Figura 18: Resultados de Ce (ds/cm) para cada uno de los años (1:2019, 2:2021 y 3:2022) de cada capa de suelo (0-15; 15-30 cm y 30-60 cm) del Sitio Alto, Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$, test de Tukey) entre los años para cada profundidad.

En la figura 22 se observa que, entre los 15 y 60 cm existe un aumento significativo de los niveles de salinidad posterior a la práctica de rolado y subsiguiente pastoreo. Este comportamiento es similar al que registra los primeros 15 cm de suelo, pero en este último caso solo se denota una tendencia. Los niveles de Ce tienden a estabilizarse o reducirse por debajo de los 15 cm de profundidad, luego del segundo año de muestreo.

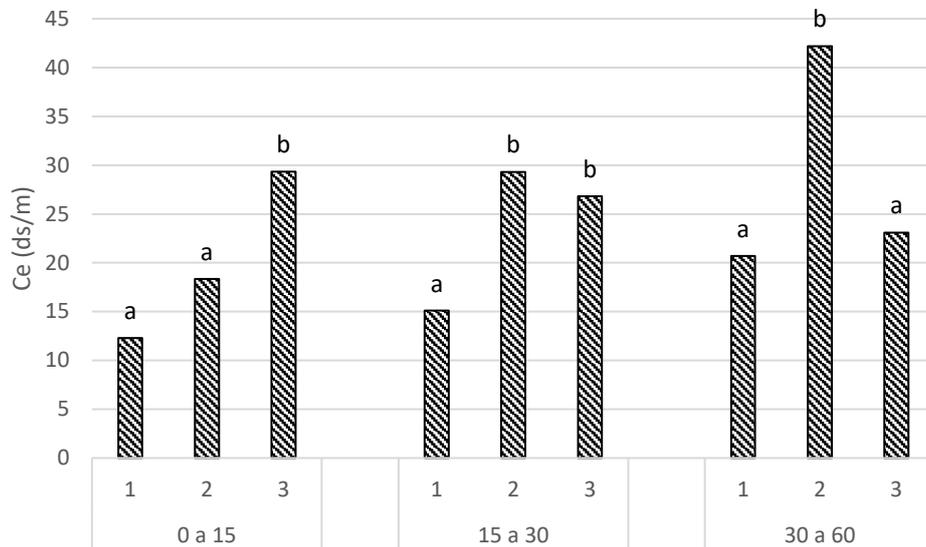


Figura 19: Resultados de Ce (ds/cm) para cada uno de los años (1:2019, 2:2021 y 3: 2022) de cada capa de suelo (0-15; 15-30 cm y 30-60 cm) del Sitio Bajo, Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$, test de Tukey) entre los años para cada profundidad.

El Sitio Bajo muestra un comportamiento similar al registrado en el Sitio Alto. En este, vemos que los niveles de salinidad aumentan significativamente en todo el perfil, posterior al aprovechamiento del pastizal (año 2). Cabe aclarar que, en este sitio de evaluación, el rolado se realizó en el año 2 y por este motivo se observa un incremento significativo de la Ce en los primeros 30 cm posterior al mencionado año.

Durante los años de estudio la región registró una sequía importante, obligando al productor a sobrepastorear los potreros. Dicha práctica dejó la superficie del suelo sin cobertura vegetal herbácea, acelerando los procesos de evaporación y salinización de los sectores. Al encontrar valores elevados en la Ce en el año 2 de evaluación se decidió reducir el tiempo de pastoreo de los lotes para poder estabilizar el sistema y ayudar a reducir la tasa de salinización registrada entre el año 1 y 2 de estudio. El mencionado manejo mostró la esperada reducción en la tasa de aumento de los niveles salinos en los suelos estudiados.

Por lo hasta aquí expuesto, es evidente que la gran limitante edáfica de estos sitios es la alta concentración salina. Por lo tanto y frente a un potencial cambio de uso de suelo, sería recomendable prestar gran atención al seguimiento de dicha variable y llevar a cabo prácticas de manejo que limiten la degradación generada por este agente. No está de más recordar que las fluctuaciones en el contenido salino del suelo son consecuencia del

movimiento y/o flujo de agua, tanto el tiempo como en el espacio (movimiento por escorrentía en sentido horizontal y movimiento por evaporación e infiltración en movimiento vertical) dentro de la cuenca. Luego, las prácticas de manejo deberían tender a propiciar el ingreso del agua en el perfil de suelo y evitar su evaporación, conservando el agua en el suelo y evitando la concentración de sales en los primeros 60 cm de profundidad.

Conclusiones

La segmentación de sitios ecológicos permitió la toma de decisiones rápidas, concretas y acertadas, impidiendo el desarrollo de procesos de degradación de suelo frente a un cambio de uso y posterior manejo ganadero. En base a los parámetros edáficos físicos y químicos aquí estudiados, queda en evidencia que la capacidad productiva de estos suelos se encuentra limitada y en un delicado equilibrio. Dicho equilibrio sería fuertemente influenciado por las condiciones climáticas y el tipo de aprovechamiento que se realice de los recursos naturales. Es así que al momento de implementar algún tipo de habilitación y poner los distintos sitios bajo producción agropecuaria, se debería prestar especial atención al manejo de la salinidad. En este sentido hay que impedir el incremento de la Ce, haciendo foco en la cobertura vegetal del suelo y la pérdida de materia orgánica.

La falta de diferencias estadísticas en el COT y Nt, podrían asociarse al escaso período de tiempo que involucra este análisis, a la combinación de los efectos producidos por las distintas prácticas de manejo desarrolladas y las condiciones ambientales presentes durante los años bajo estudio. En este sentido debemos aclarar que el proceso de rolado aporta al suelo un gran volumen de material vegetal tendiente a incrementar los niveles del carbono y nitrógeno. Sin embargo, el mencionado efecto no sería evidente en este estudio debido al sobrepastoreo realizado, el extenso período de sequía y altas temperaturas ocurridas con posterioridad al rolado.

Por lo tanto, es necesaria la elección de un tipo de cultivo y/o pastura tolerante a los altos niveles actuales de Ce registrados, como así también el delicado nivel y disponibilidad de fósforo extraíble registrado en estos suelos. Ambos factores limitarían la productividad y desarrollo de las pasturas y/o cultivos a producir en los sitios estudiados. Cabe señalar que lo hasta aquí expuesto puede generar una sinergia negativa, en donde una habilitación intensiva de los sitios, sumado a un sobrepastoreo y a la presencia de pastos nativos que no presentan crecimiento compensatorio en su tejido vegetal tan rápido como las pasturas implantadas resultaría en una baja cobertura del suelo desencadenando procesos de salinización excesivos de los lotes puestos en producción.

Capítulo 6: Evaluación y manejo del estrato herbáceo

Metodología

Los sitios evaluados fueron rolados, pero no sembrados con pasturas megatérmicas, es decir que los valores de productividad corresponden a pastos nativos presentes y algunas matas de *Megathyrsus maximum* (gaton panic) que fueron sembradas con el pastoreo de años pasados (semillas germinadas en las bostas). La productividad del pastizal se evaluó en cada sitio ecológico, sobre las mismas transectas localizadas para el muestreo de suelo y de leñosas, con 25 estaciones, mediante el método BOTANAL. Este método consiste en un doble muestreo que utiliza como referencia patrones de biomasa de la vegetación presente. Utilizando un marco metálico de 0.25m² se cortó, secó y pesó la biomasa aérea de los patrones para obtener la biomasa forrajera (kg materia seca.ha⁻¹) y la composición botánica.

El método comprende cuatro etapas:

a) Ubicación de los patrones de vegetación: es importante realizar una recorrida previa del potrero o área a relevar para conocer la distribución espacial del pastizal. El procedimiento consiste en identificar 5 muestras patrón (del tamaño de los marcos a utilizar) que cubran todo el gradiente de producción forrajera que probablemente pueda encontrarse en el potrero. En primer lugar, se identifica el patrón 5, se ubican dos muestras similares que representen la máxima disponibilidad de forraje (mayor volumen observada y al tacto). Una de ellas se deja marcada en el lugar para comparación visual y táctil posterior, y la otra se utiliza para la cosecha y pesaje del material recolectado. Posteriormente, se identifica el patrón 1, en este caso que represente la mínima disponibilidad de forraje del área a muestrear. De la misma manera, una de las parcelas se marca en el sitio elegido para comparación y la otra se cosecha y determina el peso fresco del material. Una vez obtenidos los patrones 1 y 5 se promedian los pesos obtenidos en ambas muestras y se buscan dos parcelas similares que representen dicha biomasa. La operación anterior se repite para ubicar el patrón 4 (que representará el promedio de biomasa entre el patrón 3 y el 5) y el patrón 2 (que representará el promedio de biomasa entre el patrón 1 y el 3). Es conveniente que la elección de los patrones se realice en sectores de libre acceso a la hacienda.

b) Estimación de la biomasa vegetal: una vez obtenidos todos los patrones, se define la metodología de muestreo (número y distribución de marcos) de los sitios a evaluar y se comienza a realizar las estimaciones. Se coloca el marco en el sitio determinado, se acomoda la vegetación de los bordes y se procede a la estimación. Se compara la altura, cobertura y densidad de plantas con la de los patrones y se determina si el marco a evaluar es similar a algún patrón o entre cuales se encontraría la biomasa de esa muestra. En cada marco se registrará el valor de la estimación para el posterior cálculo y, en el caso de que existan dudas, se puede volver a consultar los patrones marcados.

c) El ajuste de las estimaciones se realiza mediante el cálculo de una ecuación de regresión, por lo general lineal (pero podría ser no lineal), utilizando como variable independiente la biomasa (expresada en materia seca) y el valor de las estimaciones como variable dependiente o regresora. Esta ecuación, representada por una recta en los casos de regresión lineal, se obtiene a partir de aplicar algún paquete estadístico o a través de planillas de cálculo.

d) Transformación de las estimaciones en biomasa a partir del modelo de ajuste obtenido: finalmente las estimaciones obtenidas en las diferentes parcelas se llevan a

materia seca mediante la aplicación del modelo de ajuste obtenido. La biomasa de cada muestra se obtiene por sustitución de la estimación (x) en esta ecuación. Estos valores de biomasa se utilizan posteriormente para el cálculo de la disponibilidad de biomasa o productividad primaria neta aérea (PPNA) de las distintas unidades evaluadas.

Los muestreos de vegetación herbácea, se realizaron en otoño a fin de medir el crecimiento acumulado de biomasa durante el período estivo-otoñal, el testigo o sea la situación inicial se evaluó en otoño de 2019, previo al rolado. En 2021 se evaluó la producción de pasto del sitio alto que ya había sido rolado, en este año al momento del muestreo (otoño) el sitio bajo estaba siendo rolado por lo tanto aún no había acumulado material vegetal y en 2022 se muestreó tanto en sitio alto como bajo, en el otoño.

Resultados

La biomasa presente en los lotes previo al rolado fue de 805 kg.ha⁻¹ para el sitio alto y de 1327 kg.ha⁻¹ para el bajo (Figura 20). Cabe destacar que estos valores son mayores que los que generalmente se encuentran en sitios similares que no han recibido perturbaciones mecánicas, y esto se debe a que anteriormente el campo fue cerrado perimetralmente, y no hubo en los últimos 3 años pasaje y pastoreo de animales desde zonas circundantes. La oferta forrajera en el alto presentó un incremento en el año 2021 a 3448 kg.ha⁻¹, estos valores de kilogramos de materia seca se asemejan a los encontrados en otros ambientes con siembra de gatton panic. Teniendo en cuenta que son gramíneas nativas, principalmente *Trichloris crinita* y *Setaria leiantha*, se puede considerar como una producción óptima. En el alto, luego de un pastoreo intensivo en el invierno del 2021, la oferta forrajera se redujo notablemente, midiéndose 1358 kg.ha⁻¹ en el otoño de 2022.

En el bajo se midió un cambio de 1327 kg.ha⁻¹ a 2908 kg.ha⁻¹, con precipitaciones registradas en el establecimiento de 290 mm para el período de crecimiento 2021-2022. El sitio bajo presenta un mayor potencial productivo forrajero ya que al disponer de una menor densidad de árboles permite mayor entrada de luz solar por lo tanto mayor crecimiento de pastos.

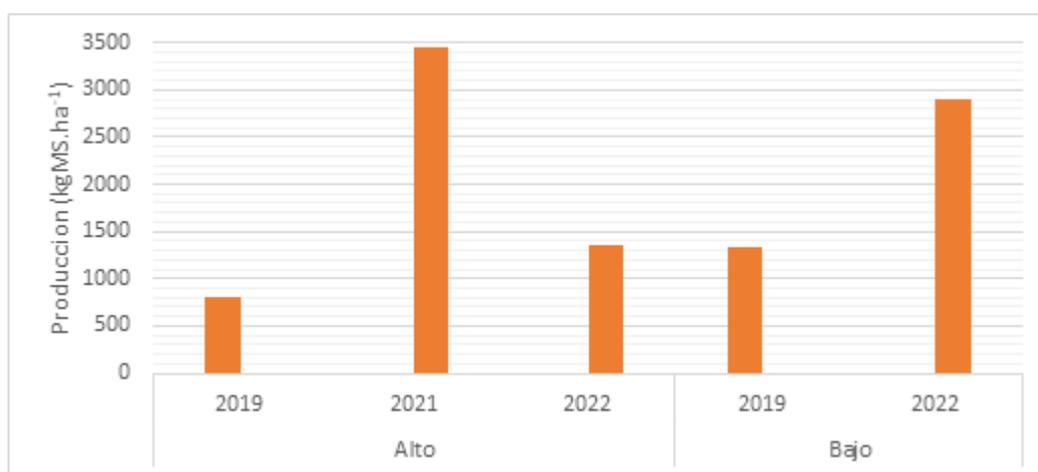


Figura 20: Producción de biomasa herbácea (kg MS.ha⁻¹) por sitio ecológico y por año, 2019, Situación Inicial y posterior al Rolado. Año 2021 al momento del muestreo aún no había sido rolado y sembrado (ver texto).

Además de un aumento en la producción forrajera se observó un aumento en la riqueza de especies presentes en los lotes (Fig. 21), encontrándose los géneros *Botriocloa sp.*, *Digitaria sp.*, *Megathyrsus maximun*, *Pappophorum sp.*, *Paspalum sp.*, *Setaria sp.*, *Sporobolus sp.*, *Trichloris sp* y *Urocloa sp.* La mayoría de estas especies son heliófilas (crecen mejor con mayor radiación solar) y el rolado al provocar una apertura de la cobertura y entrada de luz ha permitido activar el banco de semillas y su emergencia, muchas de ellas son de alta palatabilidad.

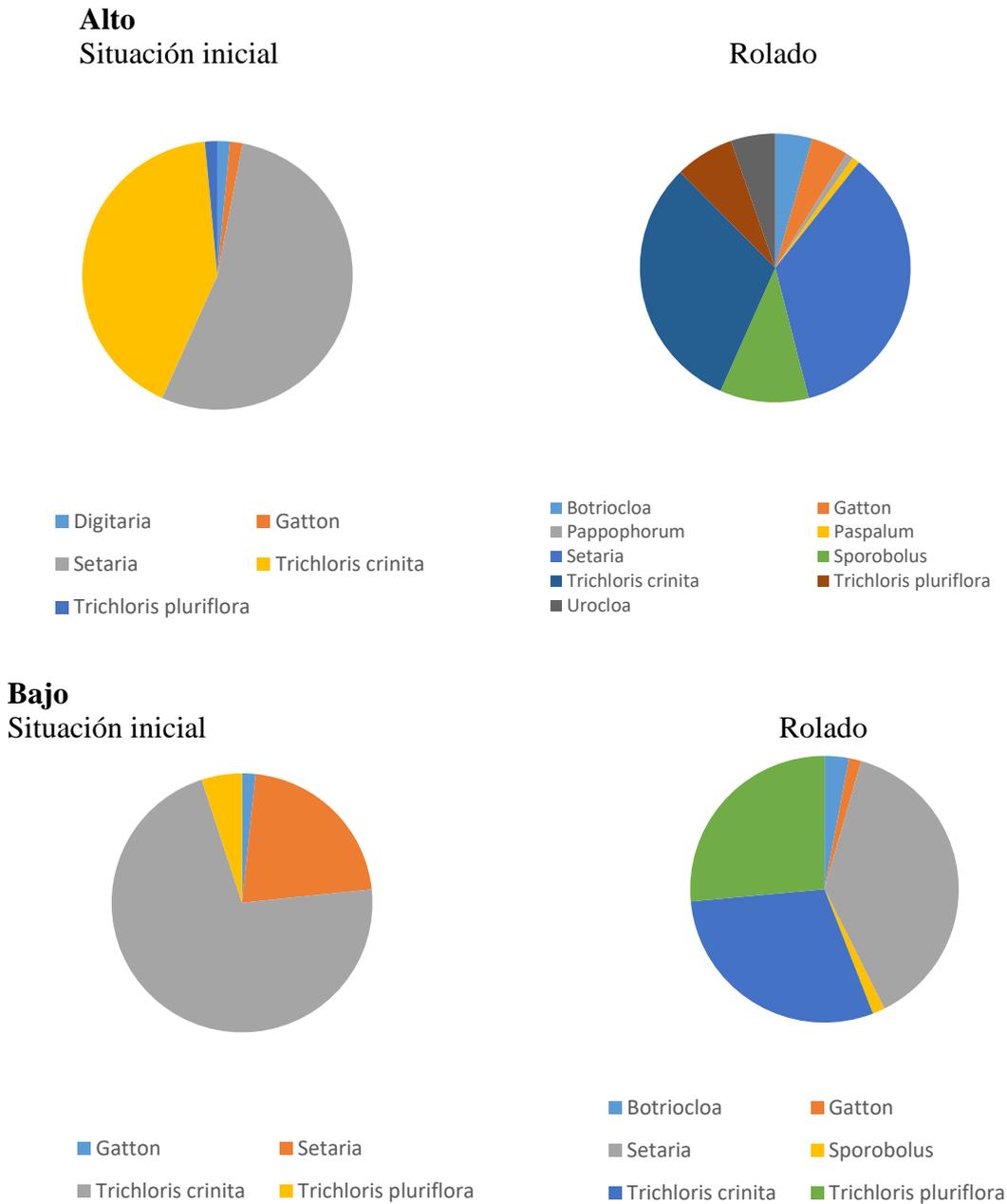


Figura 21: Frecuencia relativa (%) de especies de pasto encontradas, en los sitios alto y bajo en la situación inicial previa al rolado y posterior al mismo.

Receptividad ganadera

En la tabla 5 se presenta la receptividad ganadera calculada a partir de los valores de productividad forrajera estimada a campo, es decir la carga recomendada para estos sitios en los años evaluados y bajo el tratamiento rolado, aplicando un factor de uso de 0.5, que permite un uso racional dejando tejido vegetal en cada mata para poder conservar en buen estado la pastura. Como se observa en las situaciones iniciales la receptividad varía entre 6 a 10 has/UG (hectáreas por unidad ganadera), acorde a otros relevamientos de productividad forrajera encontrados en la provincia, en situaciones de monte sin habilitación. El pastoreo del año 2021 fue intensivo, utilizando un factor de uso mayor al recomendado. Debido a que se observó mermas en la productividad forrajera y aumentos de la salinidad por la reducción de cobertura herbácea producida por el sobrepastoreo principalmente y por las bajas precipitaciones, se recomendó al productor ajustar la carga animal y descansar la pastura. Para el pastoreo del año 2022 se utilizó un factor de uso más cercano a lo recomendable reduciendo el tiempo (días) de pastoreo. En general, la carga animal utilizada en esta experiencia fue mayor a la recomendada dado que el establecimiento no contaba con otras áreas de producción de forraje disponibles para mantener a los animales en el invierno.

Tabla 5: Receptividad ganadera calculada (usando un factor de uso de 0,5) y carga animal utilizada (factor de uso 0,8), para los sitios alto y bajo en la situación inicial y posterior al rolado.

Sitio	Tratamiento	Año	kg MS/ha	Receptividad calculada		Carga animal utilizada	
				EV/ha	ha/UG	cab/ha	has/UG
Alto	Sit inicial	2019	805,60	0,09	10,87		
Alto	Rolado	2021	3448,71	0,39	2,54	0,77	1,30
Alto	Rolado	2022	1358,64	0,16	6,45	0,23	4,40
Bajo	Sit inicial	2019	1327,47	0,15	6,60		
Bajo	Rolado	2022	2908,32	0,33	3,01	0,49	2,06

En el establecimiento el pesaje de los animales se realiza al momento de la vacunación, pero solo de algunos de ellos, los 5 más pesados y los 5 más livianos. Los animales incrementaron su peso durante el pastoreo en los lotes y mantuvieron su condición corporal, contribuyendo a un % de parición de casi el 70%. Los animales comienzan a pastorear en los potreros de sur a norte. El resto del año los animales alternan el pastoreo en lotes de monte sin rolado y otros con gatton panic, sorgo y maíz.

Conclusiones

El incremento en la oferta forrajera de especies de pastos nativos permitió la accesibilidad y el pastoreo de la hacienda. La mayor riqueza específica encontrada posterior al rolado representa un efecto positivo en la diversidad de los sitios ecológicos. Rasgo buscado en el diseño de SSP sustentables.

Los valores de carga animal utilizados superaron los recomendados provocando un sobrepastoreo. La oferta de pastos nativos solo en un año alcanzó valores similares a los producidos por el gatton panic en sistemas silvopastoriles (alto-rolado 2021), pero al año siguiente presentó una reducción significativa. En estos ambientes con problemas de salinidad y con gramíneas nativas es menester regular la carga animal acorde a la oferta

forrajera, y además monitorear las variables de producción y calidad de suelo de tal manera de realizar ajustes en el manejo. El potrero debe quedar con remanente de tejido vegetal para que sea posible el rebrote en la estación siguiente.

Capítulo 7: Evaluación y manejo de plantas leñosas

Metodología

1. *Estrato leñoso arbustivo*

Para evaluar la densidad y cobertura de arbustos se utilizó el método de T (Krebs, 1999), en 2 transectas por sitio ecológico, antes y 2 años después del rolado. El punto inicial de cada transecta fue localizado por GPS y se volvió al mismo punto. La longitud de la transecta fue de 100 m, con $n=10$ puntos de muestreo por transecta. Se registraron: el nombre científico, la altura de las plantas (m), el diámetro de la canopia individual en arbustos menores de 3m de altura y el DAP (diámetro a la altura del pecho) en árboles, (m) usando una precisión $\pm 0,10$ m. Los individuos con DAP menor a 10 cm corresponden a la regeneración del bosque. La densidad de plantas leñosas fue calculada usando ecuaciones provistas por Krebs (1999). La cobertura arbustiva individual (CI) se estimó mediante el área proyectada de cada arbusto ($m^2 \cdot ha^{-1}$). El volumen del canopeo arbustivo individual (VI) se asimiló a una figura geométrica de cono invertido y fue calculado para cada individuo en la transecta. La cobertura media de los arbustos (C, $m^2 \cdot ha^{-1}$) y el volumen medio del estrato leñoso (V, $m^3 \cdot ha^{-1}$) referida a la hectárea, fueron estimados multiplicando CI y VI por la densidad de arbustos respectivamente. El número de rebrotes que brotan desde la base del arbusto fueron registrados para cada individuo.

2. *Diversidad de especies leñosas.*

La frecuencia de especies leñosas obtenida por el método de T fue convertida a presencia-ausencia por especie para: 1) obtener el estimador no paramétrico Chao2 de la riqueza de leñosas; 2) comparar estadísticamente la riqueza de leñosas entre sitios y entre tratamientos por medio del método de rarefacción basado en muestras y extrapolación y 3) obtener el estimador no paramétrico Chao-Sorensen de la similitud en la composición de especies de leñosas entre los pares de tratamientos dentro de cada sitio. El procedimiento equipara los tamaños de muestras más pequeños a la muestra de mayor tamaño y produce una estimación de la riqueza acumulada de especies con los respectivos intervalos de confianza al 95%. La no superposición de los intervalos de confianza, indican diferencias significativas en la riqueza de especies al nivel $\alpha=0.05$. Los valores se multiplicaron por 100 para obtener el porcentaje de similitud. Las clases de similitudes fueron: 0-39,9% (baja), 40-69,9% (moderada) y 70-100% (alta). El índice de diversidad de Shannon, fue calculado empleando frecuencia de especies de árboles y arbustos.

3. *Análisis estadístico*

El efecto del sitio ecológico y del tratamiento en atributos del estrato arbustivo fue analizado mediante ANVA con las variables dependientes: CI, VI, R, C, V. Se utilizó el procedimiento de modelos lineales generalizados mixtos MLGM del programa estadístico INFOSAT. Se utilizó un $\alpha = 0,05$ en todos los análisis estadísticos. Las medias fueron comparadas usando el test de Tuckey. El análisis de diversidad se realizó mediante el Software EstimateS 9.10.0.

Resultados

1. Atributos de los arbustos: densidad, cobertura y rebrotes

El rolado puede ser considerado de una intensidad y severidad media a alta en el sitio bajo y de media a baja en el sitio alto debido a que dejó en pie individuos de DAP=10cm. No se encontraron diferencias significativas en la densidad de leñosas arbustivas entre el rolado y la situación inicial (Figura 22), mientras que los parámetros CI, VI, C, V y R fueron afectados significativamente por el rolado ($p < 0,0001$; Tabla 1). El factor sitio no tuvo efecto significativo en ninguna de estas variables. En el alto la cobertura arbustiva remanente (dos años después del rolado) fue de 67%; en la media loma 35% y en el bajo 7%. El sitio alto y media loma responden a los ecosistemas de bosques cuyo manejo está dispuesto en el marco de la Ley Nacional 26331 'Presupuestos mínimos de protección ambiental de bosques nativos' (2006) y la ley provincial. La primera ley fija como umbral mínimo de cobertura arbustiva remanente un valor de 30%, por lo que en el alto se estaría cumpliendo ampliamente y en la media loma con un margen menor, mientras que en el bajo no existe tal restricción.

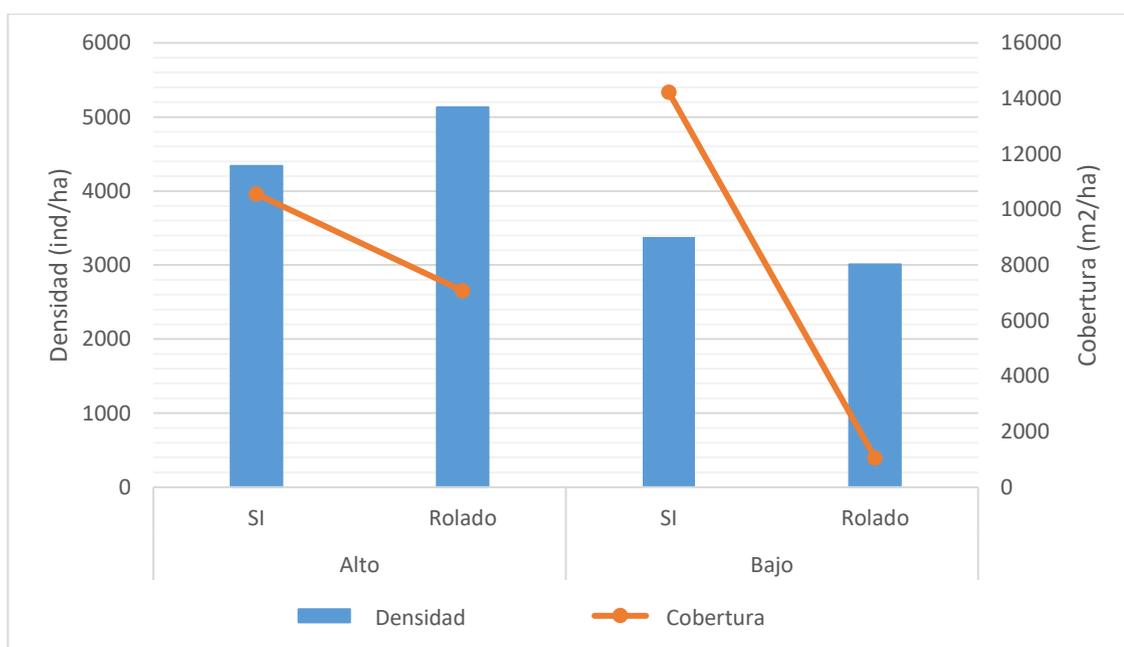


Figura 22: Densidad de arbustos ($\text{individuos} \cdot \text{ha}^{-1}$) y cobertura aérea ($\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) en tres sitios ecológicos del Chaco semiárido en la situación inicial SI, y dos años después del Rolado (RBI: rolado de baja intensidad).

Los parámetros de cobertura y volumen se redujeron posterior al rolado permitiendo una mayor accesibilidad para el ganado y para las tareas culturales. El número de rebrotes que es un indicador de la capacidad de restablecimiento que tienen las leñosas incrementó significativamente posterior al rolado (Tabla 6). Las especies arbustivas chaqueñas son principalmente rebrotadoras, producen rebrotes a partir de un banco de yemas. El número de rebrotes determina el tamaño del banco de yemas, sugiriendo mayor tejido meristemático en corona y raíces y por lo tanto la capacidad de persistencia en el sistema.

La capacidad de regeneración natural post disturbios ha sido evaluada por este equipo de trabajo en ensayos con quemas experimentales y con la combinación de rolados y pastoreos post-fuego y post-rolados. Estos trabajos sugieren una gran capacidad de regeneración frente a los disturbios comunes en la región, como los fuegos, el aprovechamiento forestal y la herbivoría. Sin embargo, la capacidad de resiliencia de las comunidades puede agotarse frente a una elevada recurrencia e intensidad de disturbios y puede ser diferente según los sitios ecológicos. Por lo cual es necesario planificar correctamente y ajustar las medidas de manejo, basándose en los cambios.

Tabla 6: Parámetros del análisis de varianza (MLGM) para: a) CI, Cobertura por arbusto (m^2 por individuo); b) VI, Volumen por arbusto (m^3 por individuo); c) R, rebrotes (número); c) C, Cobertura arbustiva por hectárea ($m^2.ha^{-1}$) y d) V, Volumen arbustivo por hectárea ($m^3/.ha^{-1}$).

Variable	AIC	BIC	p-value	Medias	
				Rolado	Testigo
CI	963	989	Trat: <0.0001 Sitio: n.s	0,99 ± 2,15	2,85±10,92
VI	556	583	Trat: <0.0001 Sitio: n.s	0,49±0,99	2,41±15,35
R	1156	1181	Trat: <0.0001 Sitio: 0.037	4,73± 47,09	2,59±3,26
C	6196	62222	Trat: <0.0001 Sitio: n.s	4469,98±	11504,05±
V	6847	6873	Trat: <0.0001 Sitio: n.s	2221,28	9978,19

Las especies dominantes en el sitio alto son *Mimozyanthus carinatus* (lata), *Celtis ehrenbergiana* (tala) y *Geoffroea decorticans* (chañar) (Figura 23). La lata, con más de 600 individuos por hectárea pertenece a la familia de las leguminosas, posee fuste multicaular (muchos tallos) y representan la mayor proporción de la biomasa. Esta especie, así como el chañar y otras, resultan relevantes para la conservación de carbono, la producción de forraje y la fijación de nitrógeno en el suelo. La lata presenta una madera muy pesada con una densidad de $0,93 \text{ gr.cm}^3$, más alta que la de quebracho blanco ($0,85 \text{ gr.cm}^3$). Esta característica se vio reflejada en la dificultad que tuvo el rolo en trocear los residuos leñosos tumbados, pero a su vez la convierte en una madera de calidad para leña.

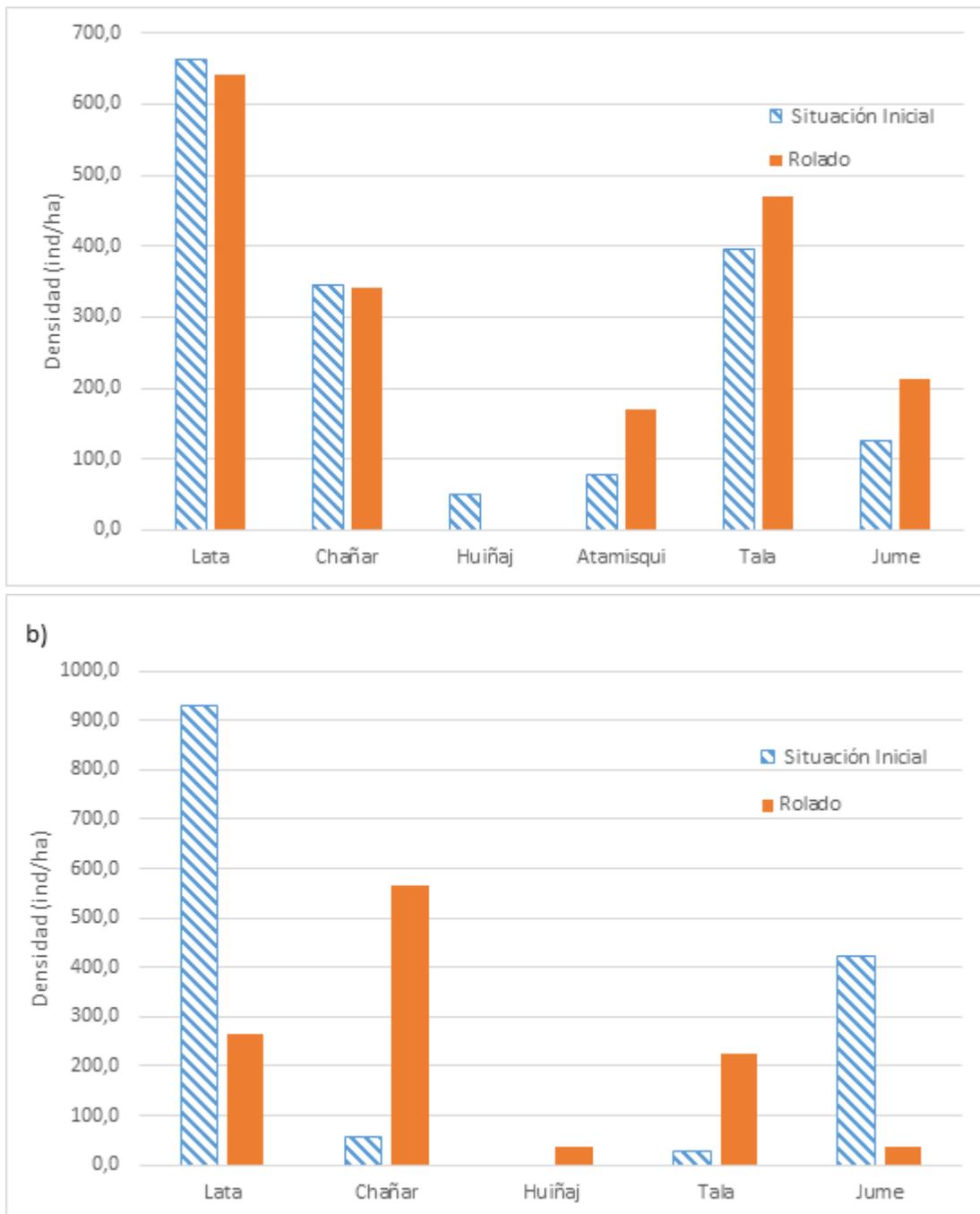


Figura 23: Densidad de arbustos discriminados por especies, en la situación inicial vs. después del rolado sitio Alto (arriba) y sitio Bajo (abajo).

2. Estructura arbórea

Los bosques de la región chaqueña son ‘irregulares’, se caracterizan por presentar una diversidad de tamaños de árboles, desde individuos muy pequeños (menores a 20 cm de altura) hasta muy grandes (mayores a 15 m de altura). Esta diversidad de tamaños conforma la denominada “estructura de la población”. La misma debe ser tomada en cuenta en el manejo de la masa arbórea para el mantenimiento y crecimiento de las poblaciones forestales.

En la figura 24, se observa que las clases diamétricas inferiores no fueron afectadas por el rolado, por el contrario, incrementaron su densidad después de dos años de rolado. Este es un efecto bastante común ya que el rolado no mata los individuos, sino que muchas veces produce un efecto de poda/multiplicación. El aumento luego del rolado en las clases diamétricas 20,1-30 y 30,1-40, se debe a que el muestreo no se realizó mediante parcelas fijas, (sino con transectas buscando siempre el mismo punto de inicio y dirección) por lo que un salto en clase diamétrica tan marcado no sería posible en la realidad.

El sitio alto que sostiene al bosque presenta una gran cantidad de individuos de DAP= 7,5 cm, lo cual representa la regeneración forestal, que es la porción más crítica de las poblaciones forestales. Esta fracción de individuos constituye el futuro de este bosque, que luego reemplazará a los individuos adultos. Además, los individuos de esta clase son susceptibles al ramoneo o pisoteo del ganado, sin embargo, en este estudio no se vieron afectados por la hacienda, probablemente porque contaban con una buena oferta forrajera. Muchos de los individuos de la regeneración corresponden a la especie “lata” que crecieron en altura compitiendo principalmente por la luz. Es común encontrar en bosques de la región chaqueña más de 1000 individuos por ha, menores a 10 cm de diámetro y menos de 200 por encima de ese diámetro.

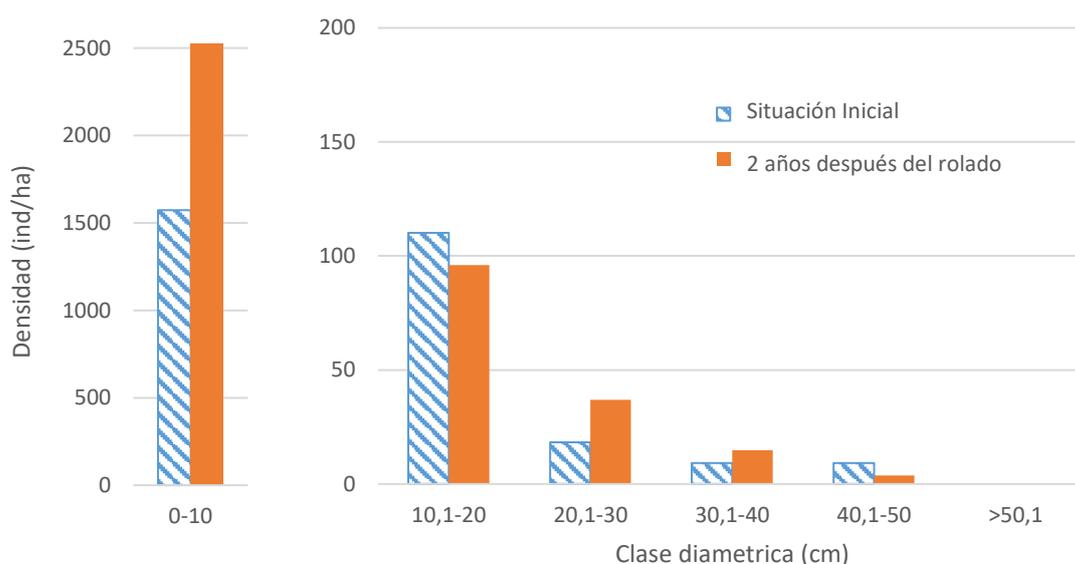


Figura 24: Densidad de árboles (ind/ha), según clases diamétricas, en el sitio ecológico alto en la situación inicial y 2 años posterior al rolado.

En este establecimiento y acorde a la vegetación de la zona, se encontraron ejemplares de *Geoffroea decorticans* “Chañar”, *Stetsonia coryne* “Cardón”, *Tabebuia nodosa* “Huiñaj”, *Neltuma ruscifolia* “Vinal”, *Aspidosperma quebracho-blanco* “Quebracho blanco” y *Mimozyanthus carinatus* “Lata” (Fig- 28).

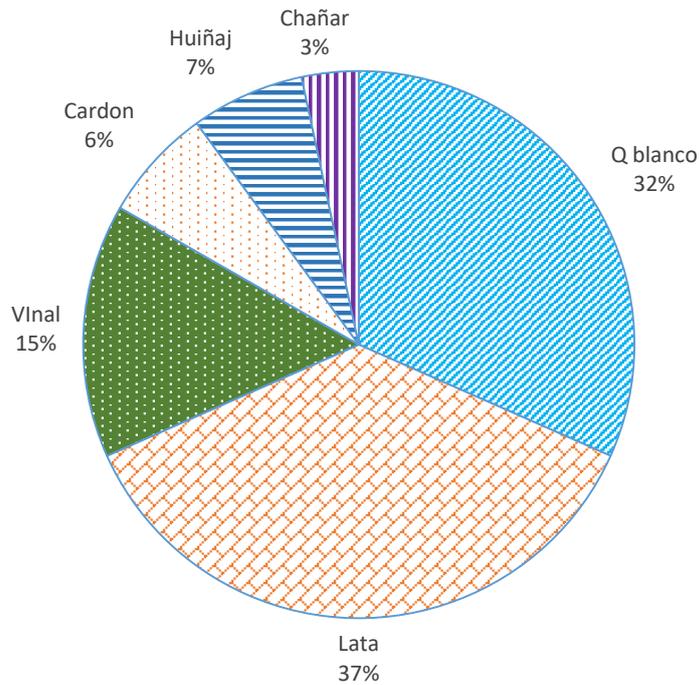


Figura 25: Especies de árboles encontradas en el sitio alto después del rolado.

3. *Diversidad de especies*

Sabiendo que la falta de superposición de los intervalos de confianza indica diferencias significativas en la riqueza de especies, se aprecia que no hubo diferencias significativas en la riqueza de leñosas entre el testigo y el rolado para cada sitio ecológico, en el análisis de rarefacción y extrapolación (Figura 26).

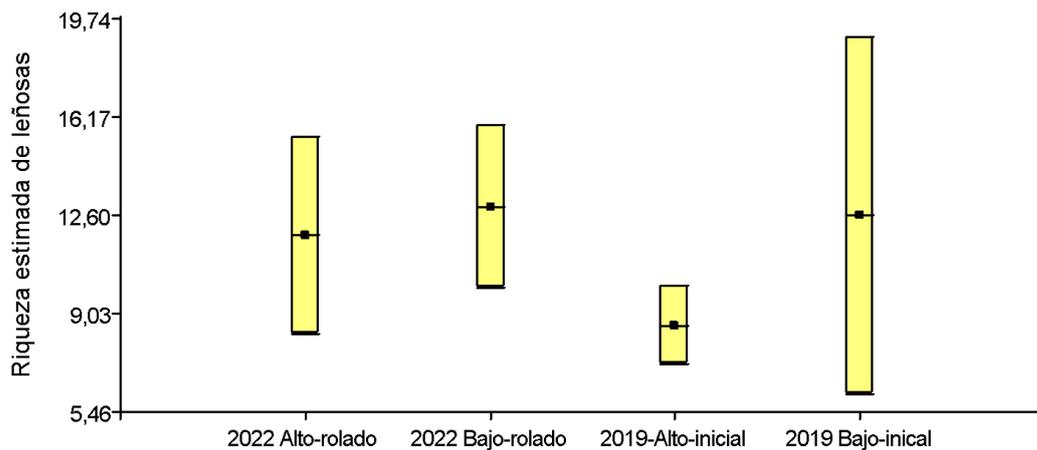


Figura 26: Riqueza acumulada de especies e intervalos de confianza a partir del método de rarefacción y extrapolación para leñosas arbóreas y arbustivas en los sitios alto y bajo antes del rolado (2019) y tres años después del rolado (2022).

La tabla 7 muestra el grado de similitud entre el Testigo sin rolar y el Rolado (RBI) para cada sitio ecológico. Se observa una moderada a alta similitud entre ambos tratamientos indicando que el impacto del rolado sobre la riqueza de especies en los tres sitios ecológicos no modifica sustancialmente la composición botánica de las comunidades presentes. Esto coincide con lo observado por Rejžek et al. (2017) en un sitio de bosque del Chaco semiárido donde el RBI que crea un sistema silvopastoril retiene la presencia y la abundancia relativa de las especies leñosas arbustivas y arbóreas.

Tabla 7: Porcentaje de similitud en la composición de especies (índice Chao-Sorensen) entre la Situación inicial (SI) y el tratamiento Rolado (RBI) para cada sitio ecológico. Entre paréntesis se indican las clases de similitud: 0-39.9% (baja), 40-69.9% (moderada) y 70-100% (alta).

		Índice de similitud Chao-Sorensen (%)
Alto-Rolado	Alto- SI	66,7
Media loma-Rolado	Media loma-SI	76,3
Bajo-Rolado	Bajo-SI	75,9

Conclusiones

En general se observó una disminución en la densidad y cobertura arbustiva en ambos sitios estudiados permitiendo una mayor accesibilidad de la hacienda en los potreros y facilidades para el trabajo del personal con los animales. Esta reducción de la biomasa arbustiva se mantuvo en el sitio alto dentro de los límites que la regulación provincial lo autoriza. Como se expresó en el anterior capítulo se observó un incremento de la productividad forrajera gracias a la reducción de la masa leñosa arbustiva y la creación de sectores abiertos a la luz solar que permitió el desarrollo de especies herbáceas. También se observó mediante los índices de similitud que no hubo diferencias en la composición botánica de las especies leñosas de los sitios antes del rolado y tres años después del mismo. Por esta razón se concluye que tanto el rolado como el pastoreo evaluados como un efecto sinérgico de ambas perturbaciones no modificaron la diversidad de especies leñosas.

Capítulo 8: Conclusiones e implicancias para el manejo

En este trabajo aportamos información sobre los atributos de la vegetación y del suelo usando el enfoque de sitios ecológicos. Este estudio se realizó en un lote de un establecimiento donde se ha intervenido con la práctica mecánica del rolado bajo prescripciones: RBI: Rolado de baja intensidad con el fin de crear un sistema silvopastoril.

La primera acción realizada fue el mapeo de sitios ecológicos, el cual requiere el análisis e interpretación de las imágenes satelitales y el conocimiento de expertos locales apoyándose en las observaciones y muestreos a campo. El trabajo interdisciplinario contribuye a generar un mapa de sitios ecológicos apropiado. La buena elección y caracterización de los sitios ecológicos definen las prácticas y las decisiones de manejo, por ello representa una etapa clave del proceso. Las imágenes satelitales mostraron una similitud en las variaciones del NDVI en el área rolada comparada con otra área sin perturbación colindante a la primera, lo que revela que el tratamiento mecánico no fue realizado con una intensidad alta modificando drásticamente la cobertura vegetal.

Una forma de diagnosticar el estado de los sitios ecológicos es evaluando los atributos de la vegetación como: productividad forrajera, composición botánica, densidad y volumen de arbustos, estructura arbórea. Desde el punto de vista ganadero, un aspecto sumamente importante a manejar es la accesibilidad. Es decir, la facilidad del tránsito del personal y de la hacienda en un potrero, permitiendo así un manejo del rodeo y un pastoreo eficiente. Poder observar fácilmente la hacienda permite identificar patrones y hábitos de pastoreo, y también supervisar la sanidad de vientres y terneros. Las ramas y espinas de los arbustos y árboles jóvenes dificultan la accesibilidad, muchas veces seriamente, limitando el potencial ganadero. El rolado es la práctica que permite mejorar la accesibilidad en estos casos, mediante el corte y el aplastamiento del estrato arbustivo.

Los parámetros del suelo evaluados en este estudio fueron el contenido de C y N, el contenido de sales y su dinámica a lo largo de los años y la densidad aparente. En este estudio la salinidad juega un papel muy importante debido a las características agroecológicas del área y ha influenciado sobre las decisiones para la aplicación del rolado y el manejo del pastoreo. A partir de los datos relevados se puede afirmar que los sitios ecológicos deben tener un manejo de uso del suelo diferenciado, atendiendo el mantenimiento de la cobertura (vegetación viva y/o muerta) y potenciando la incorporación de residuos orgánicos.

Los atributos de suelo y vegetación deben ser establecidos de manera cuantitativa y dentro de rangos aceptables de variabilidad espacial y temporal para poder diagnosticar, si por ej. un sistema de aprovechamiento ‘silvopastoril’ responde a criterios de sustentabilidad. Existe poca información sobre los atributos de las distintas comunidades leñosas y herbáceas que componen los sitios ecológicos de la provincia de Santiago del Estero y sus cambios post-disturbio. Esta información es clave para entender las características de las perturbaciones y sus efectos en el ecosistema, es decir su “régimen”.

Las perturbaciones representan una fuente importante de heterogeneidad en la estructura de las comunidades naturales por lo que, conocer el régimen con el que ocurren

permitiría entender mejor su funcionamiento. En general, las perturbaciones deben ser estudiadas, teniendo en cuenta atributos como la intensidad, severidad y frecuencia, entre otros. Las perturbaciones como el tratamiento mecánico (rolado) y el fuego, modifican el ambiente físico y producen diferentes efectos sobre la estructura aérea y las oportunidades para la emergencia y establecimiento de los grupos funcionales. La práctica del rolado debe ser planificada tomando en cuenta aspectos claves como el ancho del rolo y su peso, críticos para definir la intensidad del rolado, entre otros. Un rolo de tamaño pequeño permite una mayor maniobrabilidad del tractor y por lo tanto esquivar individuos que no se desean aplastar.

Otro aspecto clave al momento de planificar una intervención es el manejo de los residuos resultantes de las prácticas antrópicas (silvícolas, ganaderas u otras). En este estudio este aspecto no fue considerado por cuestiones de tiempo y operatividad, pero constituyen una línea de investigación en futuras evaluaciones. Los residuos leñosos generados por el rolado sumados a los que ya se encuentran sobre el suelo (ya sea por individuos muertos naturalmente u otras causas) conforman una biomasa que puede ser considerada combustible para posibles fuegos accidentales o prescritos. Cuando la práctica del rolado sea más intensa y genere residuos de diámetros mayores a 2,5 cm los fuegos que ocurran tendrán efectos relevantes sobre las propiedades del suelo.

Las recomendaciones sobre el manejo del pastoreo mediante el ajuste de la carga animal en este estudio se basaron en las determinaciones de la oferta forrajera y los parámetros del suelo principalmente la dinámica de las sales, evaluados en cada año. Sin embargo, las cargas utilizadas fueron superiores a las que los potreros podían sostener. Los años en los que se realizó esta experiencia fueron complicados en relación a las precipitaciones, a la oferta forrajera y al precio de la hacienda y en general. Los productores ganaderos de la región tuvieron que realizar un sobrepastoreo de los campos (Comunicaciones personales de varios productores). En este estudio, los animales aumentaron de peso y mantuvieron su condición corporal, a pesar de que la oferta de pasturas naturales no fue óptima. La parición, de casi el 70%, fue un valor muy bueno para la región y para un año seco. Se ha recomendado al productor sembrar en la próxima estación de crecimiento con pasturas subtropicales que permitan una mayor oferta forrajera con mejor calidad nutricional y una mayor cobertura del suelo de manera de controlar el ascenso de las sales a superficie.

Los parámetros estudiados deben ser monitoreados anualmente para detectar cambios positivos y tendencias negativas de manera de tomar acciones de corrección, verificando si los objetivos planteados están siendo cumplidos.

Agradecimientos

Agradecemos la confianza depositada en este equipo de trabajo del dueño del establecimiento Sr. Hugo Masella y su asesor técnico Ing. Agr. Raúl Perez, así como el financiamiento para la realización de este estudio. Agradecemos también los importantes aportes económicos brindados por los proyectos PE 504 y PE 514 de INTA. Estamos agradecidos por la constante colaboración del personal de campo del establecimiento principalmente de Nicolás Gutierrez. Agradecemos la lectura y aportes a este documento de los Ingenieros Sebastián Mora (INTA Anguil), Julio Michela y María Cristina Sanchez (EEA Santiago del Estero).

Referencias

Albanesi A., Kunst C., Anríquez A., Silverman J., Ledesma R., Navall M., Domínguez Nuñez J., Duffau R., Suárez R., Werenistky D., Raña E. Socolik L., Coria D., Coria O. 2013. Rolado selectivo de baja intensidad (RBI) y sistemas silvopastoriles de la región chaqueña. En Libro: Hacia la construcción del desarrollo agropecuario y agroindustrial. De la Faya al NOA. 1ed. Magna Publicaciones, 260 p.

Angueira M.C. 2016. Relevamiento de suelos utilizando las nuevas técnicas de Geomática: un caso en Santiago del Estero, Argentina. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba, España. 335 pp.

Bravo, S.; R. Abdala; F. del Corro; V. Ibáñez-Moro; A. C. Santacruz-García; D. Loto y F. Ojeda. 2018. Regeneración en especies de leñosas nativas del Chaco de Argentina y su respuesta a disturbios. Libro: Los bosques y el futuro. Capítulo 10. FCF.UNSE. 127 p.

Cambardella C.A, Elliott E.T. 1992. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 777-783.

Casillo J., Kunst C., y Semmartin M. 2012. Effects of fire and water availability on the emergence and recruitment of grasses, forbs and woody species in a semiarid Chaco savanna. *Austral Ecology* 37: 452–459.

Coria, R. D., C. R. Kunst, and S. Bravo. 2021. Un aporte al entendimiento de la lignificación de los pastizales/sabanas del Chaco Semiárido sudamericano. *Ecología Austral* 31:456–474. <https://doi.org/10.25260/EA.21.31.3.0.1615>

Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Cuadroda, M. y Robledo, C.W. (2008). InfoStat, versión 2008, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

ESA, 2017a. Sentinel-2 - Missions - Resolution and Swath - Sentinel Handbook [WWW Document]. URL <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrumentpayload/resolution-and-swath> (accedido 8/03/2022).

Gorelick N., M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, R. Moore. 2017. Google earth engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone, *Remote Sens Environ*, 202, pp. 18-27.

Keane 2017. Disturbance Regimes and the Historical Range and Variation in Terrestrial Ecosystem. doi:10.1016/B978-0-12-809633-8.02397-9.

Keller, T.; Håkansson, I. 2010. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma* 154: 398-406

Krebs, C.J. 1999. *Ecological Methodology*, AddisonWesley Longman, New York, NY, USA, 2nd edition.

Kunst, C., Bravo, S, Ledesma, R, Navall M, Anriquez, A., Coria D., Silberman, J., y Albanesi, A. 2015. Ecology and management of the dry forests and savannas of the western Chaco region, Argentina, 31p. En *Dry Forests. Ecology, species diversity and sustainable management*. Nova Publishers. New York. Ed Francis Elliot Greer ISBN 978-1-63321-291-6.

Kunst, C., Monti, E., Perez, H., y Godoy, J., 2006. Assessment of rangelands of southwestern Santiago del Estero for management and research. *J. Environ. Manage* 80: 248-265.

Kunst, C., Navall, M., Coria, R.D., Ledesma, R., Tomsic, P., González, A., Gómez, A., Feuillade, D., 2015. *Guía de Prácticas Recomendables para Sistemas Silvopastoriles en Santiago del Estero. Producir carne y madera conservando el ambiente*. INTA EEA Santiago del Estero. Gobierno de la Provincia de Santiago del Estero, Santiago del Estero.

Ledesma R., Kunst C., Bravo S., Leiva M., Lorea L., Godoy J. y Navarrete V. 2018b. Developing a prescription for brush control in the Chaco region, effects of combined treatments on the canopy of three native shrub species. *Arid Land Research and Management* 32(3): 351-366.

Malanson Q., y Trabaud L. 1988. Vigour of postfire resprouting by *Quercus coccifera* L. *Journal of Ecology* 76: 351-365.

Morello J. y Adámoli J. 1974. Las grandes unidades de vegetación y ambiente del Chaco argentino. Segunda parte: vegetación y ambiente de la provincia del Chaco. INTA Serie fitogeográfica N° 13 Buenos Aires, 130 p.

Morello, J., Adamoli, J., 1968. Las grandes unidades de vegetación y ambiente del Chaco argentino. Primera parte: objetivos y metodología, Serie Fitogeográfica N° 10. INTA.

Paletto Virginia Massara y Buono Gustavo. *Métodos de evaluación de pastizales en Patagonia Sur/ compiladores: M56*– Buenos Aires: Ediciones INTA, Centro Regional Patagonia Sur, 2020. 288 p.

Rejžek, M., Coria R.D., Kunst C., Svátek M., Kvasnica J., Navall M., Ledesma R., Gómez A., Matula R. 2017. To chop or not to chop? Tackling shrub encroachment by roller-chopping preserves woody plant diversity and composition in a dry subtropical forest. *Forest Ecology and Management* 402: 29–36.

Revelo Luna, D., J. Megía Manzano, B. Montoya Bonilla y J. Hoyos García. 2020. Análisis de los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE para la caracterización del cultivo de café (*Coffea arabica*). Ingeniería y Desarrollo, vol. 38, núm. 2, pp. 298-312, Fundación Universidad del Norte.

Scholtz, Rheinhardt; Fuhlendorf, Samuel D.; Uden, Daniel R.; Allred, Brady W.; Jones, Matthew O.; Naugle, David E.; and Twidwell, Dirac. 2021. "Challenges of Brush Management Treatment Effectiveness in Southern Great Plains, United States" (2021). Papers in Natural Resources. 1443. <https://digitalcommons.unl.edu/natrespapers/1443>

Taboada, M.A.; Alvarez, C.R. 2008. Fertilidad física de los suelos. 2da Ed. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.

Tohill, J., Hargreaves, J., Jones, R., 1978. BOTANAL. A comprehensive sampling and computing procedure for estimating pasture yield and composition. I. Field sampling, Trop. Agron. Tech Mem. 8. CSIRO, Australian Div. Trop. Crops and Pastures, Brisbane, Queensland.

White P.S. y Pickett S.T. 1985. Chapter 1. Natural disturbance and path dynamics: an introduction. The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics, Academic Press, 1985, Pages 3-13, ISBN 9780125545204.