

Transformaciones socioecológicas y pérdida de bosque ribereño en la cuenca del río Calera (1990-2025)

Socio-ecological Transformations and Loss of Riparian Forest in the Calera River Basin (1990-2025)

Recibido: 30/01/2026 | Aceptado: 10/05/2026

 <https://doi.org/10.48162/rev.55.080>

Andrea Margarita Díaz

Universidad Nacional de Tucumán,
Facultad de Filosofía y Letras,
Departamento de Geografía,
Instituto de Estudios Geográficos,
San Miguel de Tucumán, Argentina

 <https://orcid.org/0009-0000-0126-0400>
margaretdiaz@filo.unt.edu.ar

Cómo citar: Díaz, Andrea Margarita (2026). Transformaciones socioecológicas y pérdida de bosque ribereño en la cuenca del río Calera (1990-2025). *Revista Proyección, Estudios Geográficos y de Ordenamiento Territorial*, (39), Instituto CIFOT, Universidad Nacional De Cuyo, 1-16, ISSN 1852-0006.

Resumen: Este estudio analiza las dinámicas de los Sistemas Socio-Ecológicos y la pérdida de bosque ribereño (1990-2025) en la cuenca del río Calera (Tucumán, Argentina). Mediante SIG y sensores remotos (Landsat, RapidEye y PlanetScope), se cuantificó la transformación del suelo. Los resultados evidencian un proceso sostenido de transformación antrópica: la vegetación natural se redujo un 59,2% (de 275 ha a 112 ha), mientras la superficie transformada aumentó de 678 ha a 1.085 ha. Se evidencia que la fragmentación persiste pese a la Ley N° 8304 de 2010, impulsada por la expansión citrícola y la minería de áridos, asociadas a posibles alteraciones en la conectividad ecológica del corredor ribereño y en la dinámica hidrológica local. Se demuestra la ineffectividad de la gobernanza territorial en ecosistemas de transición bajo condiciones de salinidad natural. Se concluye la urgencia de implementar una restauración funcional y conservación de cabeceras para recuperar la integridad del sistema y mitigar el riesgo de inundaciones.

Palabras clave: Teledetección, uso del suelo, bosque de ribera, restauración ecológica, cuenca hidrográfica.

Abstract: This study analyzes the dynamics of Socio-Ecological Systems and the loss of riparian forest (1990–2025) in the Calera River basin (Tucumán, Argentina). Using GIS and remote sensing (Landsat, RapidEye, and PlanetScope), land transformation was quantified. The results reveal a sustained process of anthropogenic transformation: natural vegetation decreased by 59.2% (from 275 ha to 112 ha), while transformed surfaces increased from 678 ha to 1,085 ha. The evidence shows that fragmentation persists despite Law No. 8,304 of 2010, driven by citrus expansion and aggregate mining (sand/gravel extraction). These activities are associated with potential alterations in the ecological connectivity of the riparian corridor and local hydrological dynamics. The study demonstrates the ineffectiveness of territorial governance in transition ecosystems under

conditions of natural salinity. It concludes with the urgent need to implement functional restoration and headwater conservation to recover system integrity and mitigate flood risks.

Keywords: Remote sensing, land use, gallery forests, ecological restoration, watersheds.

Introducción

La gestión integral de las cuencas hidrográficas constituye uno de los mayores desafíos para la geografía física y ambiental contemporánea, ya que requiere una comprensión holística que logre integrar las dinámicas biofísicas naturales con los complejos procesos de ocupación y transformación humana. En la provincia de Tucumán, las cuencas situadas en el sector noreste han experimentado transformaciones territoriales significativas desde mediados del siglo XX.

En el contexto regional, la subcuenca del río Calera se distingue por sus particularidades geomorfológicas e hidrológicas, al constituir el único tributario de la margen izquierda del río Salí en este sector del piedemonte tucumano, descendiendo desde las Sierras del Nordeste (D'Urso, 2007). Con sus nacientes en las Sierras del Nordeste —específicamente en los Bordos de La Lechuzita a 1.660 msnm— el curso recibe al arroyo Sucio y al arroyo Tranquitas antes de conformar el río Calera (Rodríguez *et al.*, 2007). Este gradiente altitudinal actúa como un corredor biológico esencial entre diversos pisos de vegetación, insertándose predominantemente en la Provincia de las Yungas y haciendo transición hacia el Distrito del Chaco Serrano (Arana *et al.*, 2021). No obstante, la trayectoria histórica de las actividades productivas ha generado una presión antrópica sostenida que compromete la integridad y funcionalidad de estos ecosistemas nativos.

Un factor crítico en la degradación de este sistema fluvial es la actividad minera. La cuenca presenta una notable variedad litológica que incluye rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, las cuales son objeto de una intensa explotación para la obtención de áridos (Tomo, Fogliata, & Sarapura Martinez, 2021). Esta actividad, concentrada en el cauce y sus márgenes, no solo remueve la cobertura vegetal riparia, sino que altera la morfología del lecho y la estabilidad de las riberas, modificando la respuesta hidrológica del río ante eventos extremos.

A pesar de la vigencia de marcos regulatorios como la Ley de Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos —Ley Provincial N° 8304— (Tucumán, 2010), la evidencia empírica sugiere que la fragmentación y pérdida de los bosques de ribera continúa activa en el territorio. Esta aparente contradicción entre la normativa ambiental y la realidad territorial subraya la necesidad de realizar estudios multitemporales precisos que permitan cuantificar el daño ambiental acumulado.

En este marco, el objetivo principal de la presente investigación es analizar integralmente las características naturales y sociales de la subcuenca del río Calera y cuantificar la evolución de la cobertura vegetal en su tramo inferior durante el período 1990-2025, con el propósito de identificar tendencias de

transformación territorial y sus posibles efectos sobre la funcionalidad ecológica del sistema ribereño. Mediante el uso de herramientas de teledetección de alta resolución, se busca identificar las áreas críticas para la conservación y proponer estrategias de restauración ecológica, entendida esta última como el proceso de asistir la recuperación de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido (Clewell & Aronson, 2013).

Marco teórico

El enfoque de los Sistemas Socio-Ecológicos (SSE)

Para comprender la dinámica del río Calera, es imperativo superar la dicotomía entre naturaleza y sociedad. La cuenca debe ser entendida como un Sistema Socio-Ecológico (SSE), definido como un sistema complejo donde los componentes biofísicos y sociales están intrínsecamente vinculados a través de ciclos de retroalimentación (Berkes & Folke, 2000). En este marco, la degradación del bosque ribereño no es solo un evento biológico, sino una ruptura en la resiliencia del sistema que afecta los servicios ecosistémicos de regulación hídrica de los que depende la población de El Timbó y El Naranjo.

Los Servicios Ecosistémicos y la Regulación Hídrica

La geografía física moderna pone especial énfasis en los Servicios Ecosistémicos (SE). Los bosques de ribera actúan como "infraestructura verde" crítica, proveyendo servicios de regulación que incluyen la mitigación de picos de crecida, la estabilización de márgenes y el filtrado de sedimentos (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Teóricamente, el bosque ripario funciona como una zona de amortiguamiento (buffer zone) que aumenta la rugosidad hidráulica del terreno, transformando flujos de energía cinética destructiva en procesos de infiltración y depósito controlado. La pérdida de esta zona, como se observa en el río Calera, implica la transición hacia un paisaje de "desierto hidrológico" donde el riesgo de desastre aumenta exponencialmente.

Geografía del Riesgo y Vulnerabilidad Social

El riesgo no es un fenómeno natural, sino una construcción social. Siguiendo a autores fundamentales de la geografía del riesgo, este se define como el resultado de la interacción entre una amenaza (la inundación torrencial) y una vulnerabilidad (la precariedad de los asentamientos y la falta de defensas naturales). En la cuenca del Calera, la vulnerabilidad es "producida" por el modelo extractivo: la minería de áridos y la expansión citrícola eliminan la protección natural, mientras que el crecimiento demográfico expone a más personas al peligro (Casso, Natenzon, & Williams, 2020). Este concepto de vulnerabilidad territorial es clave para entender por qué las inundaciones son cada vez más frecuentes a pesar de que las lluvias no hayan aumentado en la misma proporción.

Ecología de la Restauración: De la "Reforestación" a la "Trayectoria Histórica"

Es vital distinguir entre la simple plantación de árboles y la Restauración Ecológica. Según la Society for Ecological Restoration (SER), la restauración es un proceso de asistencia para la recuperación de la integridad funcional. Teóricamente, debemos basarnos en el concepto de trayectoria histórica (Howell, Harrington, & Glass, 2012): no buscamos volver a un estado prístino imposible, sino orientar al ecosistema hacia una condición de salud y autosustentabilidad.

En ambientes de transición como el ecotono Yungas-Chaco, la restauración debe contemplar la resiliencia ecológica, que es la capacidad del sistema para absorber perturbaciones y reorganizarse. La restauración en el río Calera se presenta, entonces, como un acto de justicia territorial, devolviendo a la cuenca su capacidad de proteger a los habitantes de los efectos del cambio climático y la degradación productiva.

Ecología del Paisaje: Fragmentación y Conectividad en Corredores Riparios

La ecología del paisaje proporciona el marco analítico para interpretar los cambios espaciales observados en el río Calera. Según Forman y Godron (1986), el paisaje se compone de una matriz, parches y corredores. En este estudio, la matriz ha transitado de ser predominantemente boscosa a ser una matriz agrícola-industrial. Los bosques de ribera actúan como corredores biológicos lineales que facilitan el flujo de especies, energía y materia entre las unidades de las Yungas y el Chaco.

La fragmentación, definida como el proceso de división de un hábitat continuo en parches más pequeños y aislados, tiene consecuencias directas en la biodiversidad. El "efecto borde" resultante altera las condiciones microclimáticas (mayor incidencia solar, menor humedad) y facilita la invasión de especies exóticas. En el río Calera, la atomización de parches a un tamaño promedio de 3,2 ha sugiere que el corredor ha perdido su conectividad estructural, lo que impide que el bosque funcione como un filtro eficaz contra los sedimentos y agroquímicos provenientes de los cultivos de citrus y soja circundantes.

Ecohidrología y Dinámica de Solutos en Ambientes de Transición

La Ecohidrología estudia las interacciones funcionales entre los componentes hidrológicos y bióticos de los ecosistemas. En cuencas con particularidades litoestratigráficas como la del río Calera, la presencia de la Formación Río Salí introduce un factor abiótico crítico: la salinidad natural. Los bosques ribereños en este contexto no solo regulan el flujo de agua, sino que intervienen en los ciclos biogeoquímicos de solutos sulfatados.

Teóricamente, las zonas de amortiguamiento (buffers) vegetales actúan como reguladores de la conductividad eléctrica del agua superficial. La eliminación de la vegetación nativa adaptada a estas condiciones sulfatadas rompe el equilibrio de evapotranspiración, pudiendo provocar una salinización secundaria de los suelos en la llanura de inundación. Este fenómeno es vital para la restauración

ecológica, ya que el sustrato remanente tras la deforestación y la minería de áridos posee restricciones químicas que limitan la supervivencia de especies no halófitas o no adaptadas al estrés osmótico local.

Gobernanza Territorial y la Efectividad de las Políticas Ambientales

La brecha entre la Ley N° 8304 de OTBN y la realidad observada en los resultados (pérdida de 78 ha post-ley) nos remite al concepto de Gobernanza Territorial. Esta se entiende como el proceso de coordinación entre actores públicos, privados y la sociedad civil para gestionar el espacio geográfico. Sin embargo, en el noreste de Tucumán, la gobernanza se ve tensionada por lo que algunos autores denominan "territorios de excepción", donde la lógica del mercado extractivo (minería de áridos y agroindustria) prevalece sobre la normativa ambiental (Casso, Natenzon, & Williams, 2020).

El concepto de "parques de papel" o leyes nominales describe situaciones donde existe un marco legal robusto pero una nula capacidad de control y vigilancia (enforcement). En la cuenca del Calera, la persistencia de la fragmentación ribereña sugiere limitaciones en los mecanismos de gestión y control territorial vinculados al uso del valle de inundación. La geografía crítica sugiere que la restauración no es solo un reto biológico, sino un desafío de re-gobernanza, que implica rediseñar los acuerdos sociales sobre el uso del valle de inundación para garantizar que la ley se traduzca en una protección efectiva del corredor ripario.

En este trabajo, el análisis de las transformaciones de cobertura del suelo se aborda como un indicador indirecto de procesos ecológicos y territoriales más amplios. Desde la perspectiva de los Sistemas Socio-Ecológicos y la Ecología del Paisaje, los cambios en la cobertura ribereña permiten interpretar tendencias vinculadas a la fragmentación ecológica, la presión antrópica y las posibles alteraciones funcionales del sistema fluvial. No obstante, dichas interpretaciones se consideran aproximaciones analíticas sustentadas en antecedentes bibliográficos y en relaciones conceptuales ampliamente documentadas, sin implicar mediciones directas de variables hidrodinámicas o hidrogeomorfológicas.

Materiales y Métodos

Área de estudio

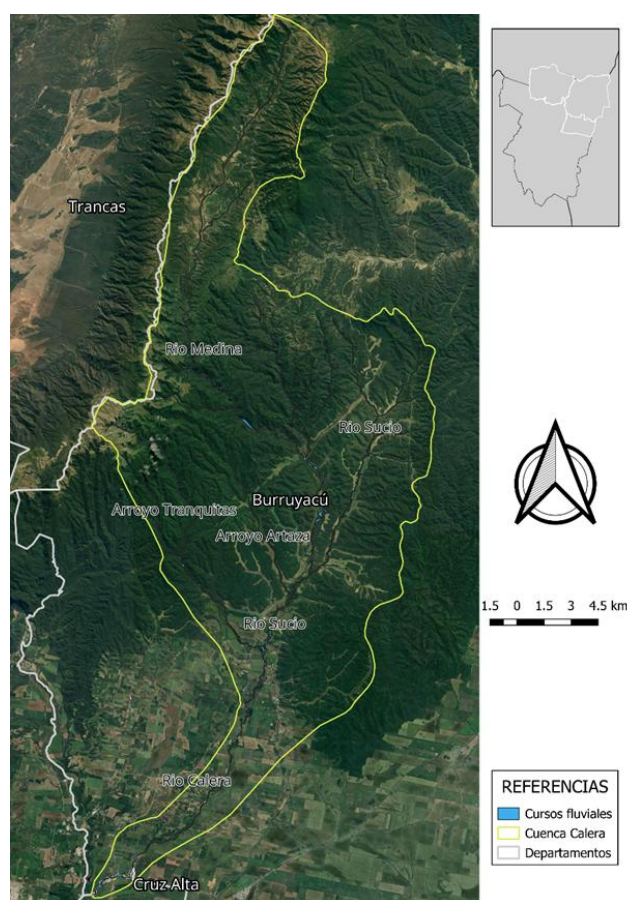
El sistema hidrográfico de la subcuenca del río Calera se caracteriza por una marcada dinámica estacional y una configuración litoestratigráfica que condiciona tanto el escurrimiento superficial como el subterráneo. El curso tiene sus nacientes a una altitud aproximada de 1.660 msnm en los Bordos de La Lechuzita, situados en las Sierras del Nordeste (Rodríguez *et al.*, 2007). En sus estadios iniciales, la red de drenaje de la cuenca alta está compuesta por diversos cursos menores que, al confluir, dan origen al río Medina. Posteriormente, este curso recibe los aportes de dos tributarios fundamentales: el arroyo Sucio y el arroyo Tranquitas, punto a partir del cual el sistema se

consolida bajo la denominación de río Calera (D'Urso, 2007; Rodríguez *et al.*, 2007).

La cuenca se ubica en el noreste de la provincia de Tucumán y ocupa una superficie total estimada entre 418 y 460 km² (D'Urso, 2007). Tal como puede observarse en la Figura N°1, este sistema se origina en las laderas de las Sierras del Nordeste y se extiende hacia el este hasta alcanzar la llanura pedemontana (Rodríguez *et al.*, 2007). Su importancia regional radica en su singularidad hidrológica, al constituir el único tributario que aporta caudales al río Salí de su margen izquierda (oriental) en este sector de la provincia (D'Urso, 2007; Díaz y Valdez, 2025b).

Desde el punto de vista administrativo, el territorio se reparte entre los departamentos de Burruyacu y Cruz Alta. La mayor extensión superficial, que comprende las zonas de cabecera y la cuenca media, se encuentra bajo la jurisdicción del departamento de Burruyacu. En este sector se localizan los núcleos poblacionales y centros administrativos que ejercen la mayor presión antrópica sobre el sistema, destacándose las comunas rurales de El Naranjo y El Sunchal, El Timbó y Villa Padre Monti. Por su parte, el tramo final del curso y el sector de su desembocadura se sitúan en el departamento de Cruz Alta, donde el sistema tributa finalmente al cauce principal del río Salí (Díaz y Valdez, 2025a).

Figura N°1: Ubicación geográfica de la cuenca



Fuente: Díaz Andrea Margarita (2025), con base en con base en imagen satelital RapidEye (2010) y capas vectoriales de la Dirección de Recursos Hídricos.

El sistema hidrográfico de la subcuenca del río Calera se caracteriza por una marcada dinámica estacional y una configuración litoestratigráfica que condiciona tanto el escurrimiento superficial como el subterráneo. El curso tiene sus nacientes a una altitud aproximada de 1.660 msnm en los Bordos de La Lechuzita, situados en las Sierras del Nordeste (Rodríguez *et al.*, 2007). En sus estadios iniciales, la red de drenaje de la cuenca alta está compuesta por diversos cursos menores que, al confluir, dan origen al río Medina. Posteriormente, este curso recibe los aportes de dos tributarios fundamentales: el arroyo Sucio y el arroyo Tranquitas, punto a partir del cual el sistema se consolida bajo la denominación de río Calera (D'Urso, 2007; Rodríguez *et al.*, 2007).

El régimen hidrológico es de tipo pluvial estival, con una concentración de caudales máximos entre los meses de diciembre y marzo, lo que genera una respuesta torrencial ante eventos de precipitación extrema en las cabeceras. Durante el resto del año, el sistema atraviesa un estiaje invernal pronunciado, reduciendo significativamente su lámina de agua superficial. Desde una perspectiva hidrogeológica, la subcuenca se integra en la unidad mayor denominada cuenca de Burruyacu (Falcón & Tineo, 2005). El subsuelo está configurado por un basamento de baja permeabilidad correspondiente a la Formación Río Salí (Terciario), sobre el cual se disponen potentes espesores de sedimentos cuaternarios que albergan acuíferos libres y semiconfinados de productividad variable (Vega, 2007; Tineo *et al.*, 1998).

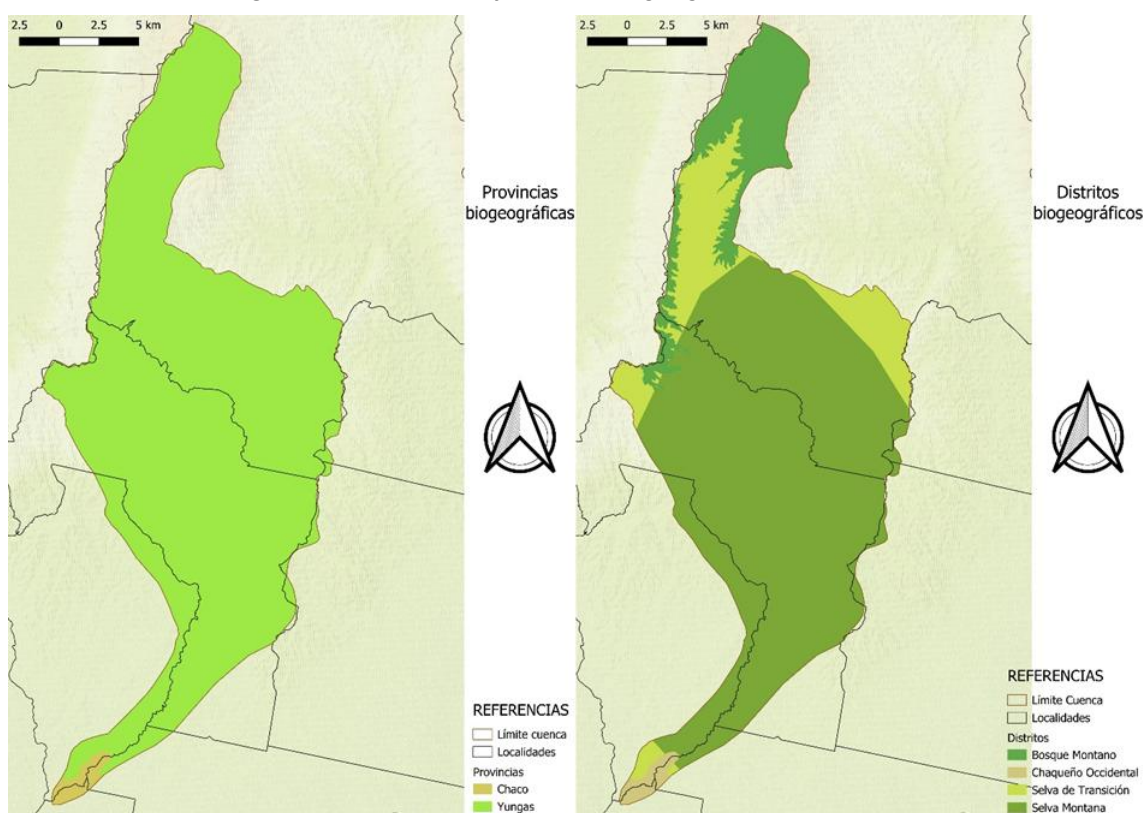
Un rasgo distintivo de la hidrografía local es la composición química de sus aguas. La interacción del escurrimiento con los sedimentos terciarios salinos de la región otorga al río una elevada salinidad natural, con un predominio de aguas sulfatadas-cálcicas y sódicas (D'Urso, 2007; Galindo *et al.* 2001). Esta particularidad hidroquímica, sumada a la variabilidad del régimen, define un escenario abiótico restrictivo que condiciona la distribución de la biota y los procesos de recarga de los sistemas subterráneos.

El clima en la cuenca del río Calera se define como subtropical con estación seca, caracterizado por una marcada estacionalidad hídrica y térmica. El régimen de precipitaciones es predominantemente estival (monzónico), concentrándose más del 80% de las lluvias entre los meses de diciembre y marzo (Galindo, Pomposiello, Sainato, Tineo, & Falcón, 2001). Existe un gradiente pluviométrico influenciado por la orografía de las Sierras del Nordeste: en las zonas de cabecera y cuenca alta, los registros oscilan entre los 800 y 1.000 mm anuales debido al efecto de las lluvias orográficas. En contraste, hacia la llanura oriental y la desembocadura, las precipitaciones disminuyen progresivamente hasta alcanzar valores cercanos a los 700 mm anuales (Rodríguez, 2006; Tineo *et al.*, 1998). Las temperaturas medias anuales rondan los 19°C, con máximas

extremas en verano que superan los 40°C y heladas ocasionales durante el invierno.

Biogeográficamente, la cuenca constituye un área de transición o ecotono de gran valor biológico. Según el esquema biogeográfico de la República Argentina, el sector superior y medio se inserta en la Provincia de las Yungas, específicamente en el Distrito de las Selvas Montanas. En este nivel altitudinal, la vegetación original se caracteriza por una estructura estratificada con especies arbóreas de gran porte. A medida que el curso desciende hacia los sectores pedemontanos y la llanura, la humedad disminuye y la selva da paso a la Provincia Chaqueña, representada por el Distrito del Chaco Serrano (Arana *et al.*, 2021) (Figura N°2).

Figura N°2: Provincias y distritos biogeográficos de la cuenca



Fuente: Andrea Margarita Díaz (2025) en base a la cartografía de Arana *et al.* (2021)

Esta transición (Yungas-Chaco) alberga comunidades vegetales adaptadas a períodos de déficit hídrico estacional y a la salinidad natural de los suelos derivados de la Formación Río Salí. En el bosque ribereño, las comunidades arbóreas cumplen una función crítica de estabilización y corredor biológico, conectando los parches de vegetación remanente en un paisaje fuertemente fragmentado por la agricultura intensiva (Díaz y Valdez, 2025a). La coexistencia de especies de afinidad húmeda y xerófila otorga a la cuenca una biodiversidad singular, cuya resiliencia se ve comprometida por el avance de la frontera

agrícola y la degradación del cauce por la extracción de áridos (D'Urso, 2007; Tomo, 2021).

Diseño metodológico

Para comprender la dinámica de ocupación del territorio y la presión sobre los recursos naturales, se realizó un análisis sociodemográfico utilizando los datos del Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas (CNPv) correspondientes a los operativos de 2010 y 2022. Este análisis permitió identificar las tendencias de crecimiento en las áreas de influencia directa de la cuenca. Asimismo, para la identificación de las unidades productivas (citricultura, granos y minería de áridos), se procesaron capas vectoriales provistas por la Red de Información para el Desarrollo Productivo (RIDES) de la provincia de Tucumán y el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

El análisis espacial y la cuantificación de los cambios en la cobertura del suelo se llevaron a cabo mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Específicamente, se utilizó el software de código abierto Quantum Geographic Information System (QGIS) en su versión estable. Para la clasificación de las coberturas, se empleó el complemento Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), el cual permite la descarga, el pre-procesamiento y la clasificación supervisada de imágenes satelitales de diversas fuentes.

Se realizó una comparación temporal cubriendo un período de 35 años (1990-2025). Para garantizar la precisión en la detección de la pérdida del bosque ribereño, se seleccionaron imágenes de distintos sensores según su disponibilidad histórica y resolución espacial:

1. Landsat 5 TM (Thematic Mapper) y Landsat 7 ETM (Enhanced Thematic Mapper): Imágenes obtenidas a través del United States Geological Survey (USGS) con una resolución de 30 metros, utilizadas para establecer la línea de base histórica (1990-2000).
2. RapidEye: Sensor comercial de alta resolución (5 metros) utilizado para el análisis del año 2010, permitiendo una mejor discriminación de parches de vegetación fragmentados.
3. PlanetScope: Constelación de satélites de la empresa Planet que provee imágenes diarias de alta resolución espacial (3 metros), empleada para la actualización del estado de la cuenca al año 2025.

El proceso técnico consistió en la generación de "Áreas de Interés" (ROI, por sus siglas en inglés Regions of Interest) para entrenar el algoritmo de clasificación. Se definieron tres clases de cobertura principales: Vegetación Natural (bosque de ribera nativo), Superficie Transformada (áreas agrícolas, zonas urbanas y sitios de extracción minera) y Cuerpo de Agua (cauce activo del río).

El proceso de clasificación se orientó a la identificación de tres categorías de cobertura principales que sintetizan la dinámica del sistema:

1. *Vegetación Natural*: Incluye remanentes de bosques de ribera y vegetación nativa de transición.
2. *Superficie Transformada*: Engloba áreas bajo uso agrícola intensivo (citrus, soja, caña de azúcar), zonas de extracción de áridos y asentamientos humanos.
3. *Cuerpo de Agua*: Corresponde al cauce activo y espejos de agua adyacentes.

El presente estudio se centra en el análisis multitemporal de coberturas del suelo mediante herramientas SIG y teledetección. En consecuencia, las interpretaciones vinculadas a procesos hidrológicos, geomorfológicos y de gobernanza territorial se plantean como aproximaciones analíticas sustentadas en antecedentes bibliográficos y relaciones espaciales observadas, sin incluir modelizaciones hidrodinámicas, mediciones sedimentológicas o análisis institucionales específicos

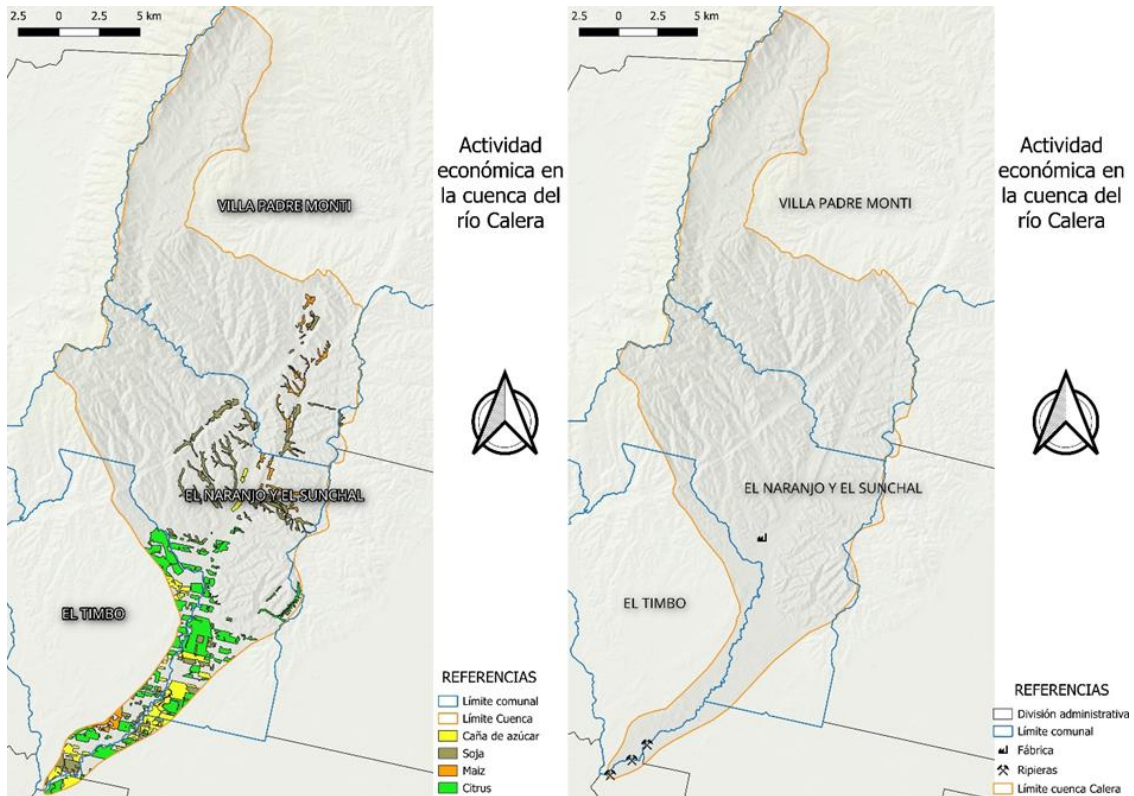
Resultados

Dinámicas sociodemográficas y presión antrópica

El análisis de los datos provenientes del CNPyV revela una tendencia de crecimiento sostenido en las áreas de influencia directa de la cuenca. La población de la comuna de El Naranjo y El Sunchal presentó un incremento del 29,7% en el periodo intercensal 2010-2022, alcanzando los 2.872 habitantes. Por su parte, la localidad de El Timbó consolidó su rol como centro de servicios logísticos para la actividad minera y citrícola, con una población de 4.606 habitantes según el operativo 2022.

Esta expansión demográfica se traduce en una presión directa sobre el valle de inundación del río. Se identificó que la estructura productiva actual está dominada por la citricultura industrial, que ocupa una superficie de 1.747 ha en el sector pedemontano, y por cultivos extensivos de soja (1.076 ha) en la llanura de inundación. La actividad minera de extracción de áridos, localizada predominantemente en el cauce activo y terrazas bajas de El Timbó, constituye uno de los principales factores de transformación física del cauce, con potenciales efectos sobre la estabilidad del lecho fluvial y la dinámica del escurrimiento (Figura N°3).

Figura N°3: Actividades económicas primarias, destacándose la agricultura y la extracción de áridos.



Fuente: Andrea Margarita Díaz (2025) con base en MDE SRTM 30 mts y capas vectoriales del IGN y RIDES.

Análisis multitemporal de la vegetación ribereña (1990-2025)

El procesamiento de imágenes satelitales permitió cuantificar una retracción crítica de los ecosistemas nativos. El Cuadro N°1 resume la evolución de las clases de cobertura en el área de estudio.

Cuadro N°1: Evolución de las clases de cobertura (en hectáreas)

Clase de Cobertura	1990 (ha)	2000 (ha)	2010 (ha)	2025 (ha)	Variación Absoluta (ha)	Variación Relativa (%)
Vegetación Natural	275	196	190	112	-163	-59,27%
Superficie Transformada	678	954	982	1.085	407	+60,02%
Cuerpo de Agua	340	143	121	98	-242	-71,17%
Total Área de Estudio	1.293	1.293	1.293	1.295*	--	--

Fuente: Andrea Margarita Díaz (2025) en base a la clasificación supervisada de imágenes Landsat 5, Landsat 7, RapidEye y PlanetScope.

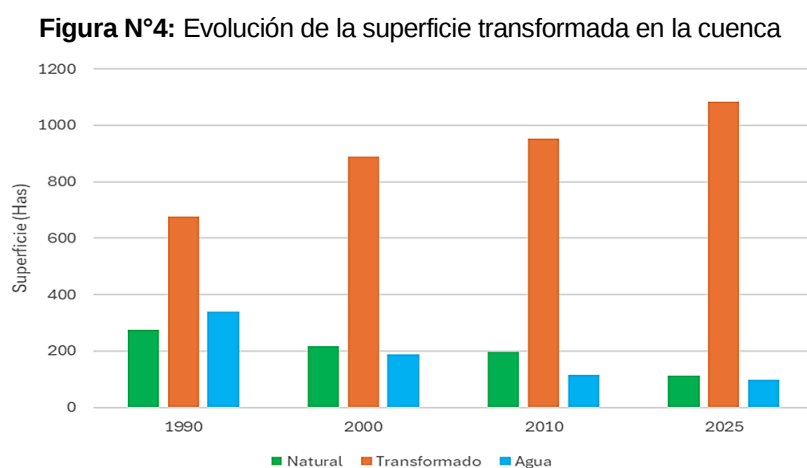
Nota: La ligera variación en el total de 2025 responde al incremento de la resolución espacial del sensor PlanetScope (3m) frente a los sensores históricos (30m).

Se observa que la mayor tasa de transformación ocurrió entre 1990 y 2000, periodo caracterizado por la expansión de la frontera agrícola mecánica. Sin embargo, en el periodo reciente (2010-2025), a pesar de las restricciones impuestas por la Ley N° 8304, se perdieron 78 ha adicionales de bosque ribereño, lo que sugiere un proceso de degradación "hormiga" y una fragmentación severa de los parches remanentes.

Matriz de transición y detección de cambios

La aplicación de técnicas de detección de cambios (Post-Classification Change Detection) permitió identificar las trayectorias de transformación predominantes. La matriz de transición indica que el 45% de las áreas que en 1990 eran bosque de ribera, se transformaron en suelo desnudo para minería o áreas de cultivo.

Particularmente, el análisis de alta resolución con imágenes PlanetScope (2025) detectó una disminución drástica del cuerpo de agua superficial. La reducción del 71% en la superficie del espejo de agua podría estar asociada, entre otros factores, al desvío de caudales para riego citrícola y a procesos de sedimentación vinculados a las actividades extractivas desarrolladas aguas arriba (Figura N°4).



Fuente: Andrea Margarita Díaz (2025) con base a resultados obtenidos de análisis de imágenes satelitales.

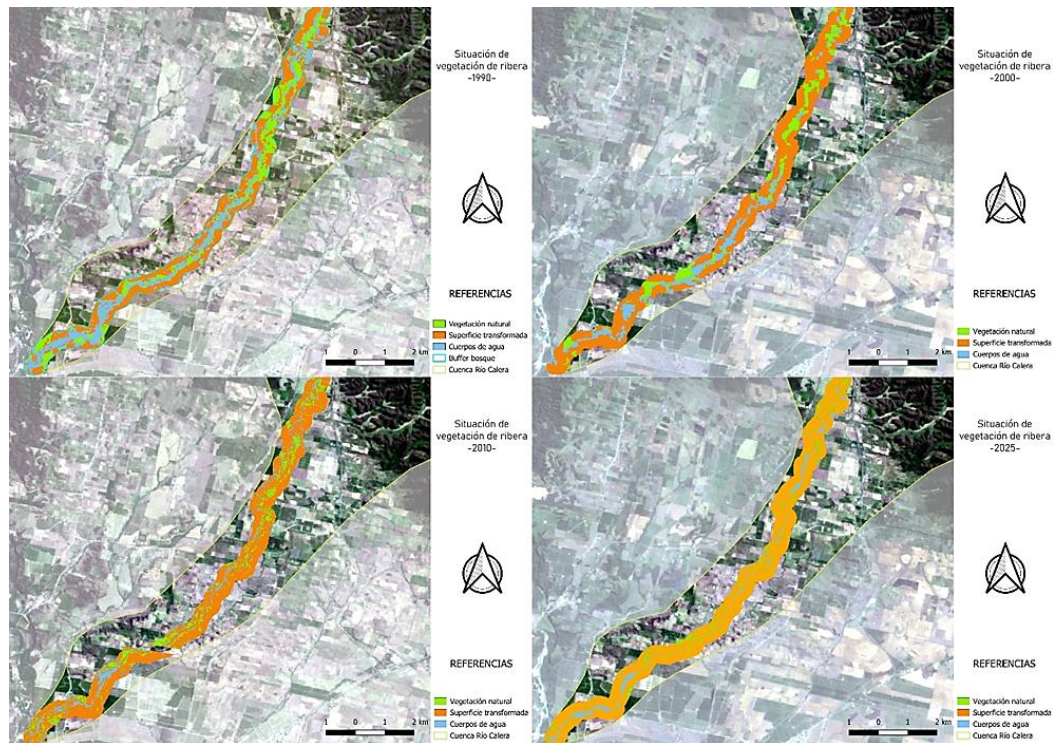
Fragmentación y pérdida de conectividad ecológica

Desde la perspectiva de la ecología del paisaje, la clase "Vegetación Natural" no solo disminuyó en superficie, sino que sufrió un proceso de atomización. El número de parches boscosos aumentó, pero su tamaño promedio disminuyó de 12,5 ha en 1990 a 3,2 ha en 2025.

Este aumento en el "efecto borde" implica que los remanentes actuales son más vulnerables a la invasión de especies exóticas y tienen una menor capacidad para

actuar como corredores biológicos entre las Yungas y el Chaco. La pérdida de conectividad en el eje longitudinal del río Calera compromete la capacidad de recuperación del sistema ante inundaciones, ya que los parches aislados no logran disipar de manera eficiente la energía cinética de las crecidas torrenciales (Figura N°5).

Figura N°5: Pérdida de cobertura natural riparia



Fuente: Andrea Margarita Díaz (2025) con base en clasificación supervisada.

Discusión

La ineficacia del marco regulatorio frente a la presión extractiva

Un hallazgo crítico de esta investigación es la continuidad del proceso de deforestación tras la sanción de la Ley N° 8304 (2010) de Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos. A pesar de que los bosques ribereños del río Calera se encuentran nominalmente protegidos, los resultados demuestran una pérdida de 78 ha en el período posterior a la ley (2010-2025). Esta tendencia sugiere que la normativa ambiental provincial, si bien establece criterios de ordenamiento territorial para la conservación de bosques nativos, presenta limitaciones en su capacidad de control y aplicación efectiva frente a la expansión de la frontera citrícola y la minería de áridos.

La fragmentación observada, donde el tamaño promedio de los parches se redujo a 3,2 ha, indica que la degradación no ocurre solo por desmonte masivo, sino por una erosión gradual o "degradación hormiga" en las márgenes, impulsada por la necesidad de ganar suelo agrícola y por la actividad de las ripieras. Como sostienen Clewell y Aronson (2013), la persistencia de estos

disturbios impide la sucesión secundaria natural, dejando al sistema en un estado de degradación estancada.

Degradación hidro-geomorfológica: el impacto de la minería y el riego

La reducción del 71,17% en la superficie de cuerpos de agua detectada por los sensores PlanetScope no puede atribuirse exclusivamente a la variabilidad climática. La coincidencia espacial entre las zonas de mayor retracción hídrica y los sitios de extracción de áridos en El Timbó sugiere una alteración profunda de la morfología del lecho. La minería de cauce modifica la pendiente local, genera incisiones que desconectan el río de su llanura de inundación y reduce el nivel freático, lo cual explica la desecación de brazos secundarios identificada en la matriz de transición.

Asimismo, la demanda hídrica de las 1.747 ha de citrus detectadas mediante RIDES ejerce una presión de detracción sobre el caudal superficial. Esta "escasez inducida" altera el régimen de pulsos necesario para el reclutamiento de especies riparias pioneras, exacerbando la pérdida de biodiversidad en el ecotono Yungas-Chaco.

Vulnerabilidad socio-ambiental ante inundaciones

El cruce de los datos del Censo 2022 con los mapas de cobertura revela una paradoja de riesgo: mientras la población en El Naranjo y El Timbó crece (+29,7%), la infraestructura natural de protección (el bosque de ribera) se reduce drásticamente. La pérdida de la "rugosidad hidráulica" que proporcionaba la vegetación nativa incrementa la velocidad de escurrimiento. En una cuenca con alta salinidad natural (sulfatada-cálcica) y respuesta torrencial, la eliminación del bosque no solo aumenta el riesgo de inundación aguas abajo, sino que acelera la erosión de las márgenes, amenazando la estabilidad de los propios emprendimientos productivos y asentamientos humanos identificados.

Hacia un modelo de restauración con base científica

La restauración de la cuenca del río Calera no puede ser un simple ejercicio de reforestación. La trayectoria histórica de degradación (Howell, Harrington, & Glass, 2012) analizada muestra que el sustrato ha sido modificado físicamente por la minería y químicamente por la salinización secundaria.

Para que la restauración sea efectiva, se propone:

- Estabilización geomorfológica: Es imperativo cesar la extracción en zonas críticas para permitir la recuperación del perfil de equilibrio del río.
- Selección de especies según hidroquímica: Dado que las aguas poseen alta salinidad (D'Urso, 2007), el "ecosistema de referencia" debe basarse en especies del Chaco Serrano y Selva Pedemontana con alta tolerancia osmótica, evitando el uso de especies exóticas que puedan alterar aún más el balance hídrico.

Conclusiones

La investigación realizada en la subcuenca del río Calera permite concluir que el sistema atraviesa una fase de degradación socioecológica crítica, caracterizada por una desconexión entre la dinámica natural del río y los procesos de apropiación territorial. Los resultados obtenidos mediante el análisis multitemporal (1990-2025) confirman una pérdida del 59,2% de la vegetación riparia nativa y una alarmante reducción del 71,1% en la superficie de los cuerpos de agua, fenómenos que sugieren una importante incidencia de las transformaciones antrópicas sobre la dinámica territorial de la cuenca.

Se identifica una dualidad territorial estructural: mientras las cabeceras conservan su funcionalidad como áreas de recarga y reservorios de biodiversidad de las Yungas, el tramo inferior ha sido transformado en una periferia extractiva. Los resultados sugieren limitaciones en la efectividad territorial de la Ley Provincial N° 8304 para frenar la pérdida de cobertura ribereña en el área de estudio; la normativa no ha logrado actuar como un freno a la expansión de la frontera citrícola ni a la minería de áridos, lo que permite definir a estos bosques como "bosques de papel": protegidos por la letra de la ley, pero vulnerables en la práctica territorial.

Desde la perspectiva del riesgo, la pérdida de cobertura vegetal ribereña podría incrementar la vulnerabilidad de las poblaciones locales frente a eventos de inundación, al reducir la capacidad de amortiguación natural del corredor fluvial. El crecimiento demográfico detectado en el Censo 2022 en localidades como El Timbó y El Naranjo ocurre en paralelo a la eliminación de las defensas naturales del río. Esta situación configura un escenario de riesgo creciente ante inundaciones torrenciales, donde la velocidad del flujo y el transporte de sedimentos se ven exacerbados por la falta de un cinturón vegetal funcional.

Finalmente, se concluye que la restauración ecológica en el río Calera es una urgencia técnica y social. Sin embargo, para ser exitosa, debe abandonar el enfoque tradicional de "reforestación estética" para adoptar un modelo de restauración funcional. Esto implica:

1. Priorizar la estabilización geomorfológica del lecho para recuperar el nivel freático.
2. Utilizar especies del ecotono Yungas-Chaco con alta tolerancia a la salinidad natural identificada en la cuenca.
3. Integrar a los productores citrícolas y mineros en programas de conservación activa para asegurar la conectividad del corredor biológico.

Este trabajo no solo aporta un diagnóstico cuantitativo inédito para la provincia de Tucumán, sino que sienta las bases para una gestión de cuencas que interprete la restauración no como un gasto, sino como una inversión necesaria

para la mitigación de inundaciones y la sostenibilidad de la vida en el piedemonte.

Referencias Bibliográficas

- Berkes, F. & Folke, C. (Eds.). (2000). *Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience*. Cambridge University Press.
- Casso, A., Natenzon, P., & Williams, F. (2020). Riesgo de inundación y vulnerabilidad territorial en cuencas pedemontanas del NOA. *Revista de Geografía Crítica*, 12(2), 45-62.
- Clewell, A., & Aronson, J. (2013). *Ecological Restoration: Principles, Values, and Structure of an Emerging Profession* (2da ed.). Island Press.
- Díaz, A. M., & Valdez, P. R. (2025a). Singularidades naturales y sociales de la subcuenca del río Calera (Dpto Burruyacu – Tucumán). *XIX Jornadas Nacionales de Geografía. Universidad Nacional de Tucumán*.
- Díaz, A. M., & Valdez, P. R. (2025b). Cartografías de la gestión y la restauración de bosques de ribera (Tucumán – Argentina). *XIX Jornadas Nacionales de Geografía. Universidad Nacional de Tucumán*.
- D'Urso, C., Rodríguez, G., Sales, A., & Rodríguez, M. (2007). Hidroquímica de la cuenca del río Calera, provincia de Tucumán, República Argentina. *Estudios Geológicos*, 63(1), 53–63. <https://doi.org/10.3989/egeol.07631189>
- Falcón, C. M. & Tineo, A. (2005). *Estudios geofísicos en la cuenca hidrogeológica de Burruyacú, Tucumán*. IV Congreso Hidrogeológico Argentino, Argentina.
- Forman, R. T., & Godron, M. (1986). *Landscape Ecology*. John Wiley and Sons.
- Galindo, G., Pomposiello, M. C., Sainato, C. M., Tineo, A., & Falcón, C. (2001). Hidrogeological study of the Burruyacu basin, Tucumán province, Argentina. *Journal of South American Earth Science* 14 (2001) 641-650.
- Howell, E. A., Harrington, J. A., & Glass, S. B. (2012). *Introduction to Restoration Ecology*. Island Press.
- Provincia de Tucumán. (2010). *Ley N° 8.304: Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos de la Provincia de Tucumán*. Honorable Legislatura de Tucumán. <https://producciontucuman.gob.ar/wp-content/uploads/2021/04/Ley-Prov-Tuc-8304.pdf>
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: Wetlands and water synthesis*. World Resources Institute.
- Rodríguez, M., D'Urso, C., Rodríguez, G., López, J. P., & Sales, A. (2007). *Caracterización hidrogeoquímica de la cuenca del río Calera, Provincia de Tucumán, República Argentina*. XXI Congreso Nacional del Agua, Tucumán, Argentina.
- Tineo, A., Falcón, C. M., García, J. W., D'Urso, C. H., Galindo, G., & Rodríguez, G. (1998). Hidrogeología de Tucumán. En *Geología de Tucumán* (pp. 259–274). Colegio de Graduados en Ciencias Geológicas de Tucumán.
- Tomo, F. E., Fogliata, A., & Sarapura Martínez, J. I. (2021). Caracterización petrográfica de materiales pétreos provenientes del río Calera, provincia de Tucumán, para su uso como áridos. *Acta Geológica Lilloana*, 33(2), 58-73. <https://doi.org/10.30550/j.agl/2021.33.2/2021-11-26>