

## Diversidad funcional a través de una gradiente de Uso de Suelo en la cuenca de Lucre – Quispicanchi – Cusco.

### Functional diversity across a land use gradient in the Lucre watershed - Quispicanchi – Cusco.

Alvaro C. Silva - Espejo<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Escuela Profesional de Biología, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Av. La Cultura 733, Cusco, Perú; [alvaro.silva@unsaac.edu.pe](mailto:alvaro.silva@unsaac.edu.pe)

#### RESUMEN

Se evaluó la diversidad funcional a lo largo de una gradiente de uso de suelo en la cuenca de Lucre, provincia de Quispicanchi, categorizando tres unidades principales: agrícola, natural y seminatural. Con imágenes satelitales y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), se elaboró un mapa detallado del uso del suelo. Se instalaron parcelas de 50 x 10 m para árboles y de 10 x 10 m para arbustos en cada unidad de cobertura vegetal, donde se analizaron variables florísticas y estructurales. Se seleccionaron las especies arbustivas más representativas (70%) y todas las especies arbóreas para medir ocho rasgos funcionales clave: área foliar, contenido foliar de nitrógeno y fósforo, agentes de dispersión y polinización, tipo de fruto, clonalidad y leguminosidad. Los resultados identificaron tres tipos funcionales de plantas: TFP 1 (no resiliente), asociado a suelos naturales; TFP 2 (poco resiliente), relacionado con suelos agrícolas; y TFP 3 (resiliente), característico de suelos seminaturales. Los índices de diversidad funcional (MPC, FAD2, Rao, FDis y FDP) variaron significativamente según el tipo de suelo, indicando que los cambios en el uso del suelo afectan la funcionalidad ecosistémica. Se concluyó que la reducción de la cobertura vegetal en la cuenca genera alteraciones significativas en los servicios ecosistémicos, destacando la importancia de implementar estrategias de manejo sostenible para preservar la funcionalidad y los beneficios ecosistémicos en esta región altoandina.

**Palabras clave:** diversidad funcional, rasgo funcional, tipo funcional de planta, uso de suelo, cuenca.

#### ABSTRACT

Functional diversity was evaluated along a land use gradient in the Lucre basin, Quispicanchi province, categorizing three main units: agricultural, natural, and semi-natural. Using satellite imagery and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), a detailed land use map was developed. Sampling plots of 50 x 10 m for trees and 10 x 10 m for shrubs were established in each vegetation cover unit to study floristic and structural variables. The most representative shrub species (70%) and all tree species were selected to measure eight key functional traits: leaf area, foliar nitrogen and phosphorus content, dispersal and pollination agents, fruit type, clonality, and legume presence. Results identified three plant functional types: TFP 1 (non-resilient), associated with natural soils; TFP 2 (less resilient), linked to agricultural soils; and TFP 3 (resilient), characteristic of semi-natural soils. Functional diversity indices (MPC, FAD2, Rao, FDis, and FDP) varied significantly across land use types, indicating that changes in land use impact ecosystem functionality. It was concluded that the reduction in vegetation cover generates significant alterations in ecosystem services, underscoring the importance of sustainable management strategies to preserve functionality and ecosystem benefits in this Andean region.

**Key words:** functional diversity, functional trait, plant functional type, land use, basin.

#### INTRODUCCIÓN

La expansión de las actividades humanas ha generado transformaciones significativas en los ecosistemas naturales, afectando la biodiversidad y alterando su funcionalidad. En particular, el cambio en el uso del suelo constituye uno de los principales factores que contribuyen a la degradación de los ecosistemas, provocando pérdida de cobertura vegetal y afectando la provisión de servicios ecosistémicos esenciales como la regulación hídrica, la conservación del suelo y el almacenamiento de carbono (Díaz y Cabido., 2001; Chapin et al., 2000). Estos impactos son especialmente evidentes en regiones altoandinas como la cuenca de Lucre, provincia de Quispicanchi, donde las prácticas agrícolas, la expansión urbana y la explotación de recursos naturales han intensificado las perturbaciones ecológicas.

Estudios previos han demostrado que la diversidad funcional, definida como la variabilidad de rasgos funcionales en las comunidades biológicas, es un indicador clave de la capacidad de los ecosistemas para resistir y recuperarse de estas perturbaciones (Díaz & Cabido, 2001; Lavorel et al., 2007). Sin embargo, en los Andes peruanos, existe una brecha significativa en la evaluación de cómo estas dinámicas afectan la funcionalidad de los ecosistemas y la resiliencia de sus comunidades vegetales frente al cambio en el uso del suelo.

En este contexto, esta investigación analizó cómo la diversidad funcional de especies arbóreas y arbustivas

responde a las perturbaciones derivadas de una gradiente de uso de suelo en la cuenca de Lucre, provincia de Quispicanchi. Las características de los ecosistemas altoandinos, con su marcada estacionalidad y adaptaciones ecológicas, han sido ampliamente descritas por Sarmiento (1986), quien destaca su fragilidad frente a las actividades humanas. La zona presenta un mosaico de usos de suelo influenciados por la agricultura, la ganadería y la urbanización, generando una gradiente de perturbación ecológica. Esta gradiente incluye áreas agrícolas, seminaturales y naturales, cuyas dinámicas y relaciones con la biodiversidad funcional han sido abordadas en trabajos como los de Moraes et al. (2016), resaltando la importancia de estas categorías en la planificación territorial. Los objetivos fueron: determinar la gradiente de uso de suelos, caracterizar la estructura y composición florística de las comunidades vegetales en cada unidad, determinar los tipos funcionales de plantas en función de sus rasgos adaptativos frente al uso del suelo y evaluar la relación entre los tipos funcionales de plantas y el gradiente de uso de suelos. Estos resultados buscaron contribuir al entendimiento de las dinámicas ecológicas en ecosistemas altoandinos y a la planificación de estrategias sostenibles de manejo y conservación.

#### METODOLOGÍA

La cuenca de Lucre, ubicada en la provincia de Quispicanchi, región del Cusco, forma parte de la cordillera sur

de los Andes peruanos. Cubre un área de aproximadamente 10,501.16 hectáreas y se encuentra dentro de los pisos ecológicos de Queswa, Transición y Puna según Olarte y Dollfus (1999). La altitud varía entre 3,072 metros (en Huacarpay) y 4,489 metros (en el cerro Condorsayaña) sobre el nivel del mar. Geográficamente, se localiza entre las coordenadas UTM X: 192,328.29 a 207,737.41 y Y: 8,482,531.78 a 8,494,310.05, con Datum WGS84 (Per-IMA, 2012). El acceso se realiza principalmente a través de la carretera Cusco-Urcos, parte del corredor interoceánico, con rutas adicionales hacia puntos referenciales como Yanamanchi, Pacramayo y Huaracay mediante trochas carrozables y caminos peatonales. Predominan las actividades agropecuarias, pero la expansión urbana y la infraestructura han generado impactos como el sobrepastoreo y la contaminación del suelo y el agua (INDECI & PNUD, 2011). Además, alberga el humedal de Huacarpay, un ecosistema Ramsar de alta biodiversidad que enfrenta amenazas por actividades humanas y eventos naturales, lo que requiere una gestión sostenible (Per-IMA, 2012; INDECI & PNUD, 2011).

Para determinar la gradiente de uso de suelos en la cuenca de Lucre, se utilizaron imágenes satelitales Landsat 8, procesadas con correcciones geométricas y atmosféricas mediante el software ArcGIS Pro. Se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) utilizando las bandas roja e infrarroja cercana, lo que permitió identificar variaciones en la cobertura vegetal asociadas al vigor y densidad de la vegetación (Jackson et al., 2004; Chuvieco, 2002) posteriormente, se realizó una clasificación supervisada de las imágenes para establecer las unidades de uso del suelo: Agrícola, Natural y Seminatural, estas unidades fueron verificadas mediante trabajo de campo con datos georreferenciados recopilados con GPS, permitiendo validar las observaciones satelitales (Per-IMA, 2012). Este proceso permitió obtener mapas base detallado de la gradiente de uso de suelos, reflejando la intensidad y las actividades humanas predominantes en la cuenca.

Para caracterizar la estructura y composición florística de las comunidades vegetales en cada unidad de uso de suelo, se establecieron parcelas de muestreo sistemático. Se instalaron parcelas de 50 x 20 metros para árboles y de 10 x 10 metros para arbustos en cada unidad de cobertura vegetal (Cornelissen et al., 2003). En estas parcelas, se registraron todas las especies presentes y se midieron variables estructurales como el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura total y la cobertura de copa. Las densidades, frecuencias y dominancias relativas de cada especie se calcularon utilizando la metodología de Matteucci y Colma (1982), permitiendo estimar el Índice de Valor de Importancia (IVI) para cada especie. Este índice integró información sobre abundancia, frecuencia y dominancia relativas, proporcionando una medida cuantitativa de la relevancia ecológica de cada especie.

Para determinar los tipos funcionales de plantas en función de sus rasgos adaptativos frente al uso del suelo, se seleccionaron las especies representativas identificadas en el análisis florístico, priorizando aquellas que contribuían al 70% del IVI. A estas especies se les midieron ocho rasgos funcionales: área foliar (AF), contenido foliar de nitrógeno (CFN) y fósforo (CFP), agente dispersor, agente polinizador, tipo de fruto, clonalidad y leguminosidad (Cornelissen et al., 2003). Las variables continuas fueron normalizadas mediante el método de varianza, mientras que las categóricas se estandarizaron utilizando el método "0,1" (Casanoves et al., 2011). Los datos fueron procesados con InfoStat para calcular estadísticas descriptivas, incluyendo la media, varianza, desviación estándar y coeficientes de variabilidad (Di Rienzo et al., 2008). El análisis se complementó con un análisis de

conglomerados jerárquicos, utilizando el método de Ward y la distancia de Gower, adecuada para datos con variables mixtas (Díaz et al., 1999). Este procedimiento permitió identificar grupos funcionales que compartían características adaptativas, excluyendo especies con valores extremos como *Agave americana* y *Puya ferruginea* para evitar sesgos en los análisis. Se realizó un análisis de conglomerados jerárquicos utilizando el método de Ward y la distancia de Gower, adecuada para matrices con variables categóricas y continuas y un análisis discriminante que identificó los rasgos más relevantes para la diferenciación de los tipos funcionales.

Finalmente, para evaluar la relación entre los tipos funcionales de plantas y la gradiente de uso de suelos, se emplearon índices multirasgo como FAD2, Rao, FDis y FDP (Walker et al., 1999; Rao, 1982; Laliberté & Legendre, 2009; Petchey & Gaston, 2006), calculados con el software FDiversity. Estos índices cuantificaron la diversidad y distribución de los rasgos funcionales a lo largo de la gradiente de uso del suelo. Además, se aplicaron análisis no paramétricos como ANOSIM para evaluar similitudes multivariadas y pruebas de Chi cuadrado para analizar asociaciones entre los tipos funcionales y las unidades de uso de suelo. Los resultados fueron representados en un mapa temático en ArcGIS, mostrando la distribución espacial de los tipos funcionales en la cuenca. Estos análisis permitieron integrar información funcional y espacial para comprender las dinámicas ecológicas frente a la transformación del uso del suelo.

## RESULTADOS

Se determinaron tres unidades principales de uso de suelo en la cuenca de Lucre: Agrícola (17.09%; 1,795.03 ha), Natural (36.64%; 3,847.50 ha) y Seminatural (46.27%; 4,858.64 ha).

Las áreas seminaturales, que representaron la mayor extensión, estuvieron compuestas principalmente por matorrales y pajonales, con valores de NDVI que se distribuyeron entre 0.15 y 0.45, indicando una cobertura vegetal intermedia; las áreas naturales, que abarcaron el 36.64% de la superficie, se localizaron en las partes altas de la cuenca y presentaron los valores más altos de NDVI (0.45 a 0.55), asociados a una vegetación nativa bien conservada; por último, las áreas agrícolas, que ocuparon el 17.09% del total, se concentraron en las zonas bajas y mostraron los valores más bajos de NDVI (-0.19 a 0.15), reflejando una mayor intervención humana (Figura 1).

### Caracterización de la estructura y composición florística de las comunidades vegetales en cada unidad

Se registraron un total de 44 especies de plantas arbustivas y arbóreas, distribuidas en 18 familias botánicas, siendo las familias *Asteraceae* (18 especies) y *Fabaceae* (4 especies) las más representativas (Tabla 1). La composición florística varió significativamente entre las unidades de uso de suelo. En las áreas agrícolas, la diversidad fue baja, destacando especies con mayor adaptación a la perturbación. Las especies que conformaron el 70% del Índice de Valor de Importancia (IVI) incluyeron a *Baccharis odorata* (91.50%), *Puya ferruginea* (30.95%), *Barnadesia horrida* (28.97%), *Satureja boliviana* (19.46%), *Kageneckia lanceolata* (18.83%), *Berberis carinata* (17.72%) y *Duranta armata* (17.48%), lo que reflejó un ecosistema simplificado debido a la intervención humana. En las áreas naturales, se registró la mayor riqueza florística, con un 70% del IVI compuesto por especies típicas de ecosistemas menos impactados, como *Ribes brachybotrys* (56.82%), *Berberis carinata* (42.56%), *Barnadesia horrida* (36.09%), *Acalypha aronioides* (24.67%) y *Baccharis latifolia* (24.33%).

Estas especies resaltaron por su dominancia en un contexto de menor perturbación. Por otro lado, las áreas seminaturales presentaron una composición intermedia, que incluyó especies nativas y algunas introducidas, reflejando su condición de transición. El 70% del IVI en estas áreas estuvo conformado por *Barnadesia horrida* (50.80%), *Colletia spinosissima* (49.62%), *Viguiera procumbens* (33.01%), *Ageratina pentlandiana* (29.26%) y *Acalypha aronioides* (24.33%).

**Tabla 1.** Composición florística de árboles y arbustos en la cuenca de Lucre

N°	Familia	Especie
1	Anacardiaceae	<i>Schinus molle</i> L.
2	Asparagaceae	<i>Agave americana</i> L.
3		<i>Ageratina cuzcoensis</i> (Hieron.) R.M. King & H. Rob.
4		<i>Ageratina pentlandiana</i> (DC.) R.M. King & H. Rob.
5		<i>Ageratina sternbergiana</i> (DC.) R.M. King & H. Rob.
6		<i>Ambrosia arborescens</i> Mill.
7		<i>Baccharis boliviensis</i> (Wedd.) Cabrera
8		<i>Baccharis caespitosa</i> (Ruiz & Pav.) Pers.
9		<i>Baccharis chilco</i> Kunth
10	Asteraceae	<i>Baccharis latifolia</i> (Ruiz & Pav.) Pers.
11		<i>Baccharis odorata</i> Kunth
12		<i>Baccharis pulchella</i> Sch. Bip. ex Griseb.
13		<i>Barnadesia horrida</i> Muschl.
14		<i>Flourensia polycephala</i> M.O. Dillon
15		<i>Gynoxys longifolia</i> Wedd.
16		<i>Mutisia acuminata</i> Ruiz & Pav.
17		<i>Senecio adenophyllus</i> Meyen & Walp.
18		<i>Senecio rudbeckiaefolius</i> Meyen & Walp.
19		<i>Senecio spinosus</i> DC.
20		<i>Viguiera procumbens</i> (Pers.) S.F. Blake
21	Betulaceae	<i>Alnus acuminata</i> Kunth
22	Berberidaceae	<i>Berberis carinata</i> Lechl.
23		<i>Berberis lutea</i> Ruiz & Pav.
24	Bromeliaceae	<i>Puya ferruginea</i> (Ruiz & Pav.) L.B. Sm.
25		<i>Puya herreriae</i> Harms
26	Euphorbiaceae	<i>Acalypha aronioides</i> Pax & K. Hoffm.
27		<i>Adesmia miraflorensis</i> J. Rémy
28	Fabaceae	<i>Astragalus garbancillo</i> Cav.
29		<i>Senna birostris</i> (Dombey ex Vogel) H.S. Irwin & Barneby
30	Grossulariaceae	<i>Ribes brachybotrys</i> (Wedd.) Jancz.
31	Lamiaceae	<i>Satureja boliviana</i> (Benth.) Briq.
32	Myrtaceae	<i>Eucalyptus globulus</i> Labill.
33		<i>Rosa canina</i> L.
34	Rosaceae	<i>Kageneckia lanceolata</i> Ruiz & Pav.
35		<i>Polylepis incarum</i> (Bitter) M. Kessler & Schmidt-Leb.
36	Rhamnaceae	<i>Colletia spinosissima</i> J.F. Gmel.
37	Scrophulariaceae	<i>Buddleja coriacea</i> J. Rémy
38	Solanaceae	<i>Lycianthes lycioides</i> (L.) Hassl.
39		<i>Nicotiana glauca</i> Graham
40	Escalloniaceae	<i>Escallonia myrtilloides</i> L. f.
41		<i>Escallonia resinosa</i> (Ruiz & Pav.) Pers.
42	Verbenaceae	<i>Duranta armata</i> Moldenke
43		<i>Citharexylum argutedentatum</i> Moldenke
44	Bignoniaceae	<i>Tecoma sambucifolia</i> Kunth

En términos estructurales, las áreas naturales presentaron los mayores valores promedio de diámetro a la altura del pecho (DAP) y altura de copa, con un DAP de 25 cm y alturas superiores a 8 m, indicando una vegetación más madura y

compleja. Las áreas seminaturales mostraron valores intermedios, con un DAP promedio de 15 cm y alturas de hasta 5 m, mientras que las áreas agrícolas presentaron los valores más bajos, con un DAP promedio de 10 cm y alturas inferiores a 3 m.

Estos resultados evidencian la diferenciación estructural y composicional de las comunidades vegetales en función del uso del suelo, destacando el impacto de las actividades humanas en las áreas agrícolas y el papel de las áreas naturales como reservorios de biodiversidad. Las áreas seminaturales demostraron su importancia como zonas de transición, albergando especies de ambos extremos del gradiente de perturbación.

### Clasificación de los tipos funcionales de plantas en función de sus rasgos adaptativos frente al uso del suelo

A partir de los rasgos funcionales evaluados en las especies seleccionadas (correspondientes al 70% del IVI para arbustos y todas las especies arbóreas), se identificaron tres tipos funcionales de plantas (TFPs) (Figura 2). A continuación, se describen las características principales de los TFPs identificados.

#### 1. TFP 1: No resiliente

Este grupo incluyó especies características de áreas naturales que se distinguieron por tener hojas pequeñas, bajos contenidos foliares de nitrógeno y fósforo, y frutos predominantemente del tipo cápsula o polifolículo, mientras que los agentes de dispersión y polinización estuvieron dominados por la autocoria y los insectos, respectivamente. Estas especies evidenciaron una capacidad limitada para absorber nutrientes, con una adaptación escasa a suelos impactados, lo que las asocia a ecosistemas menos perturbados y con una baja resiliencia frente a condiciones adversas.

#### 2. TFP 2: Resiliente

Compuesto principalmente por especies de áreas agrícolas, este grupo mostró hojas de tamaño mediano, altos contenidos foliares de nitrógeno y fósforo, frutos del tipo drupa o baya, dispersión asociada al agua y polinización predominante por insectos. Además, estas especies presentaron una marcada clonalidad subterránea y una elevada capacidad de renovación de nutrientes, características que las relacionan con ecosistemas perturbados y que evidencian una alta resiliencia frente a los cambios en el uso del suelo.

#### 3. TFP 3: Poco resiliente

Este grupo incluyó especies asociadas a áreas seminaturales, con hojas grandes, contenidos foliares intermedios de nitrógeno y fósforo, y frutos principalmente del tipo samara o aquenio. Los agentes de dispersión más comunes fueron el viento, las aves y los mamíferos, mientras que la polinización también estuvo relacionada con estos últimos. Estas especies demostraron una capacidad moderada de adaptación a suelos impactados, con un nivel intermedio de respuesta funcional.

El análisis multivariado de varianza (MANOVA) confirmó diferencias significativas entre los TFPs ( $p < 0.05$ ). Además, un análisis discriminante mostró que los rasgos foliares (AF, CFN y CFP) y reproductivos (AD y AP) fueron los principales responsables de la diferenciación entre los grupos. Estos resultados muestran cómo los rasgos funcionales permiten clasificar especies según su capacidad de adaptarse y responder a distintas intensidades de uso del suelo (Tabla 2), proporcionando una base para entender la funcionalidad ecosistémica frente a las perturbaciones.

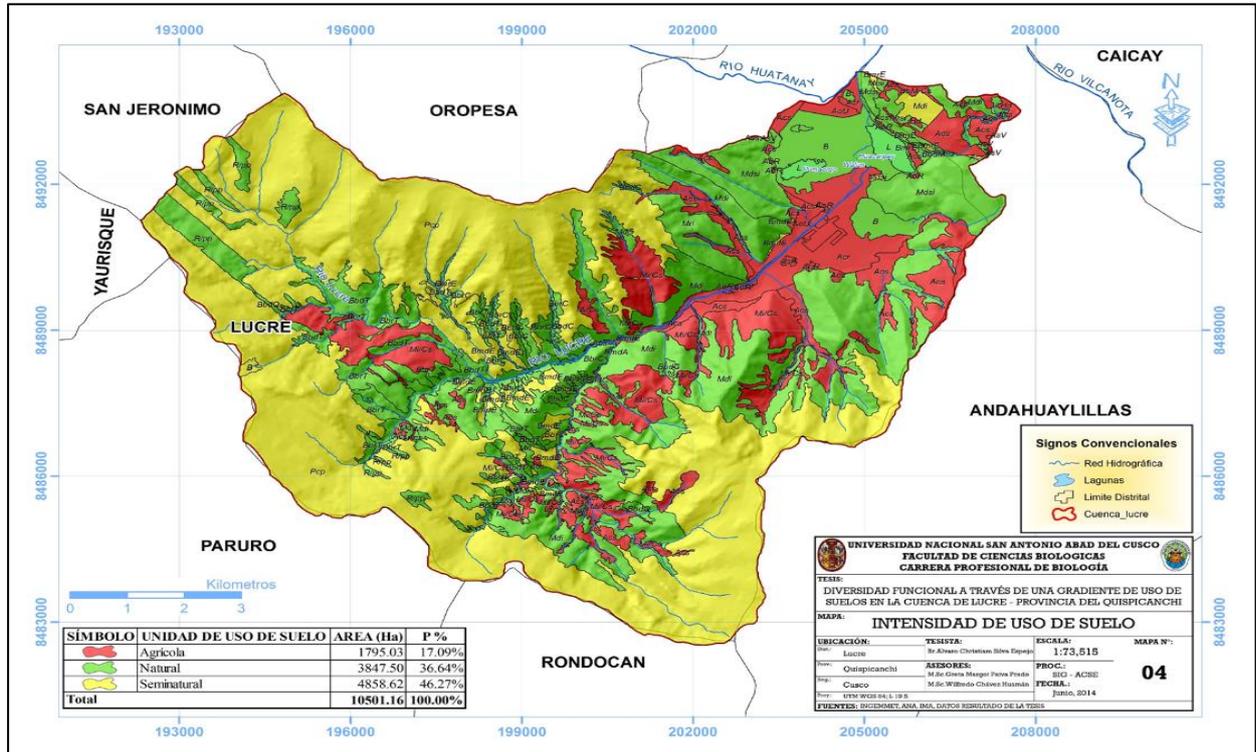


Figura 1. Mapa de uso de suelos en la Cuenca de Lucre.

Tabla 2. Valores promedio más error estándar de los rasgos funcionales dentro de cada TFP y MANOVA de la prueba de Hotelling

TFP	AF	CFN	CFP	AD	AP	TF	CL	LE	n	p<0.0001
1	230.1±174.38	16.76±1.17	1.78±0.04	1±0	1±0.13	1.14±0.32	1±0.12	1±0	6	C
2	690.83±199.33	25.42±0.92	2.19±0.04	2.12±0.11	1.09±0.09	6.18±0.22	2.09±0.17	1.15±0.06	11	B
3	1279.45±44.33	20.57±0.84	1.87±0.04	4±0	1.87±0	8.05±0.07	1.97±0	1±0	15	A

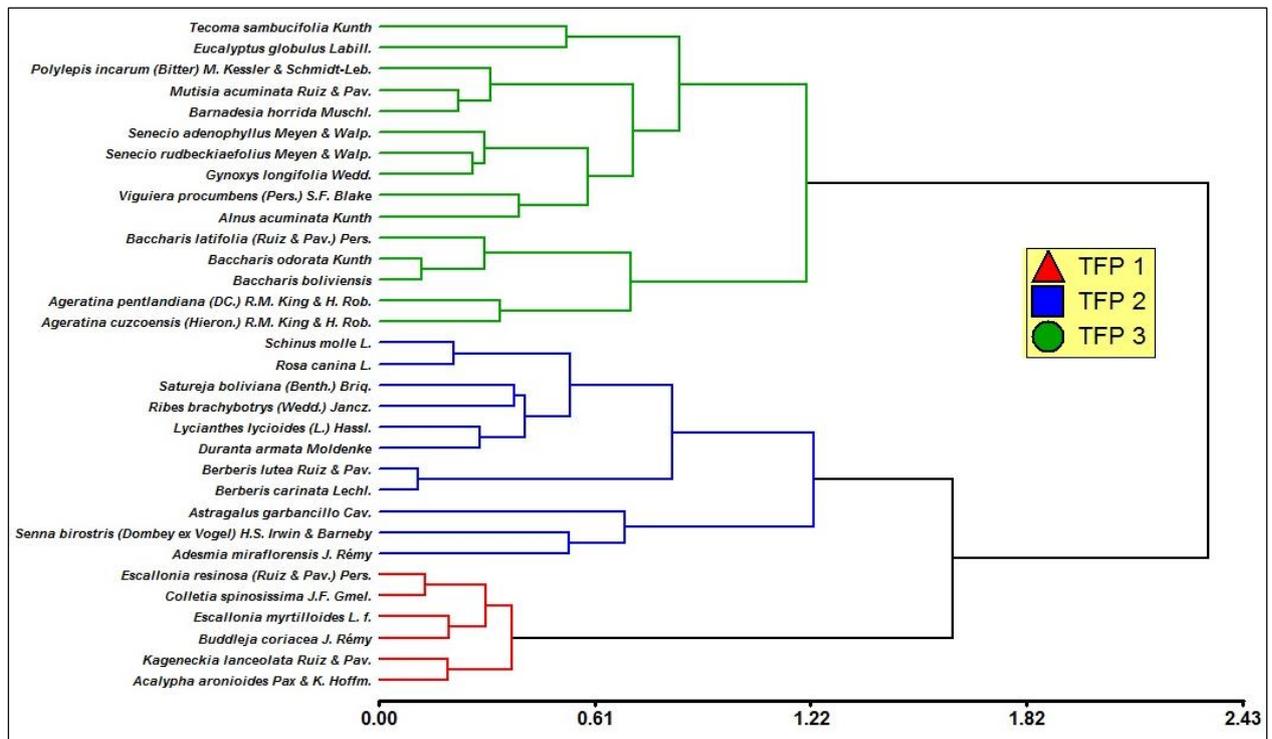


Figura 2. Dendrograma basado en el método de Ward, distancia de Gower a partir de los rasgos: AF, CFN, CFP, AD, AP, TF, CL y LE

**Relación entre los tipos funcionales de plantas y el gradiente de uso de suelo**

Se identificaron diferencias significativas en los rasgos funcionales entre las unidades de uso de suelo de la cuenca de Lucre, evidenciadas mediante el análisis de similaridad (ANOSIM), que mostró una relación directa entre los rasgos funcionales y la gradiente de uso de suelo ( $R = 0.14$ ,  $p = 0.0196$ ). Las mayores diferencias se observaron entre las unidades agrícolas y naturales ( $R = 0.39$ ,  $p < 0.05$ ), así como entre las agrícolas y seminaturales ( $R = 0.27$ ,  $p < 0.05$ ), mientras que las diferencias entre las unidades naturales y seminaturales fueron mínimas ( $R = 0.06$ ,  $p > 0.05$ ), lo que refleja cómo las actividades humanas modifican los rasgos funcionales de las especies (Tabla 3).

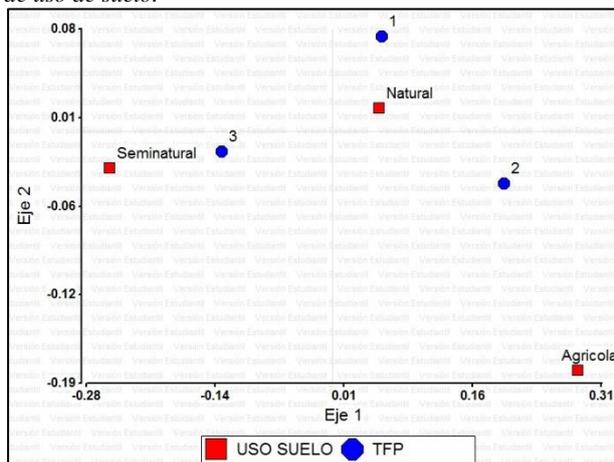
**Tabla 3.** ANOSIM para cada unidad de uso de suelo en función de rasgos funcionales

	Agrícola	Natural	Seminatural
Agrícola		0.3871	0.2702
Natural	0.00766 *		0.06368
Seminatural	0.03584 *	0.1561	
=	Valores de p		= Valores de R

(\*) Valores significativos al 0.05 %

El análisis de contingencia y correspondencia confirmó una asociación significativa entre los tipos funcionales de plantas (TFPs) y las unidades de uso de suelo ( $p < 0.0001$ ). El TFP 1 (No resiliente) predominó en áreas naturales, caracterizándose por especies de hojas pequeñas y baja capacidad de adaptación; el TFP 2 (Resiliente) se asoció principalmente a áreas agrícolas, integrando especies adaptadas a suelos impactados; y el TFP 3 (Poco resiliente) se vinculó a áreas seminaturales, con especies de hojas grandes y moderada capacidad de adaptación. Estos resultados resaltan cómo el uso del suelo influye en la funcionalidad de las comunidades vegetales (Figura 3).

**Figura 3.** Análisis de correspondencia entre TFPs y unidades de uso de suelo.

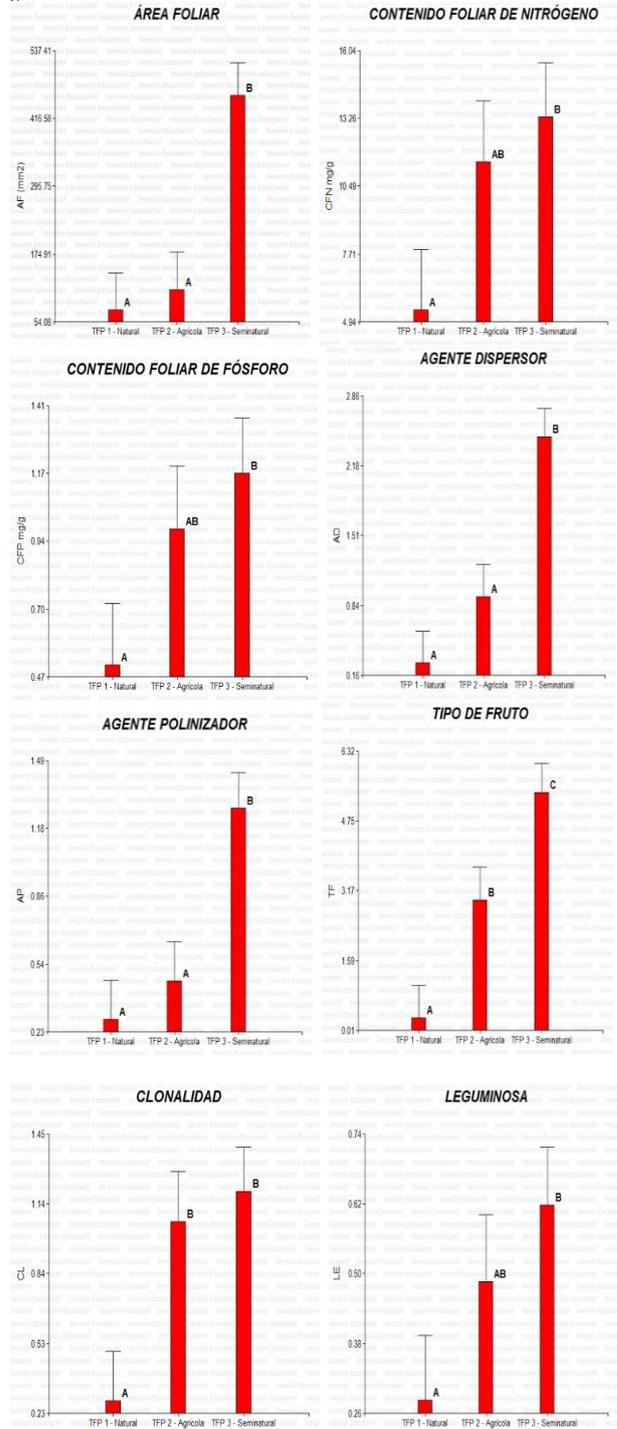


Los índices de diversidad funcional (FAD2, Rao, FDy y FDp) mostraron diferencias significativas entre los TFPs ( $p < 0.0001$ ) (Tabla 4).

Las áreas seminaturales (TFP 3) registraron la mayor diversidad funcional, mientras que las áreas naturales (TFP 1) presentaron la menor, lo cual sugiere que los ecosistemas seminaturales, sujetos a niveles moderados de perturbación, mantienen una mayor diversidad funcional, mientras que las áreas naturales muestran menor variación debido a una selección más uniforme de rasgos funcionales.

El análisis de varianza realizado con el estadístico de comparación LDS-Fisher para los valores de media ponderada de la comunidad (MPC) de los rasgos funcionales en relación a los TFPs y uso de suelo, indica que existe un efecto significativo ( $p < 0.001$ ) de los TFPs sobre la distribución de los rasgos funcionales en una gradiente de uso de suelo, para el área foliar (AF), agente dispersor (AD), agente polinizador (AP), tipo de fruto (TF) y clonalidad (CL) (Figura 4).

**Figura 4.** Variación MPC de los rasgos por TFP asociado a la gradiente de uso de suelo





funcional, mediante índices multirasgo, mostró diferencias significativas entre las unidades de uso de suelo. Las áreas seminaturales presentaron los valores más altos de FDis (0.65), indicando una alta heterogeneidad de rasgos, mientras que las áreas agrícolas registraron los valores más bajos (0.32), reflejando un ecosistema simplificado por la intervención humana. Este patrón concuerda con la hipótesis de perturbación intermedia propuesta por Connell (1978), la cual sugiere que niveles moderados de perturbación fomentan la coexistencia de especies con diferentes estrategias funcionales. Las áreas naturales, aunque menos perturbadas, presentaron un FDis promedio de 0.48, destacándose por mantener especies clave con estrategias conservativas esenciales para la estabilidad ecológica, como lo señalaron Bermeo (2010) y Chávez-Huamán (2011).

El área foliar (AF) emergió como el rasgo funcional más variable, con valores extremos observados en especies como *Agave americana* (250 cm<sup>2</sup>) y *Puya ferruginea* (60 cm<sup>2</sup>). Este rasgo, clave para las estrategias fotosintéticas y de adquisición de recursos, ha sido ampliamente reconocido por Cornelissen et al. (2003) como un indicador fundamental de la funcionalidad vegetal. En la cuenca de Lucre, el AF reflejó adaptaciones específicas frente a gradientes de uso del suelo, subrayando su relevancia en la predicción de respuestas funcionales, como lo destacaron Díaz et al. (1997) y Lavorel et al. (1997).

Por otro lado, la redundancia funcional observada en especies como *Barnadesia horrida* y *Berberis carinata*, presentes en todas las unidades de uso de suelo, respalda lo planteado por Walker et al. (1999), quien argumenta que la redundancia funcional contribuye a la estabilidad del ecosistema al garantizar la continuidad de procesos esenciales incluso ante la pérdida de especies. Este hallazgo subraya la importancia de combinar la diversidad funcional y la redundancia como herramientas clave para evaluar y manejar la resiliencia ecosistémica en regiones con alta vulnerabilidad, como los ecosistemas altoandinos.

La ecología funcional, como marco conceptual, enfatiza que las respuestas de los ecosistemas a las perturbaciones no solo dependen de la riqueza de especies, sino también de los rasgos funcionales que estas aportan al sistema (Grime, 1998; Díaz et al., 2001). Este estudio, al integrar la diversidad funcional y los TFPs, posiciona la cuenca de Lucre como un modelo relevante para comprender cómo los gradientes de uso del suelo influyen en la funcionalidad ecosistémica. Estos hallazgos son fundamentales para diseñar estrategias de conservación y manejo sostenible, ya que evidencian cómo la interacción entre las comunidades vegetales y su entorno físico determina la resiliencia y sostenibilidad de los ecosistemas altoandinos frente a presiones antropogénicas y ambientales.

Con el presente estudio se concluye que el gradiente de uso de suelo afecta significativamente los rasgos funcionales y la diversidad funcional de las comunidades vegetales en la cuenca de Lucre. Los Tipos Funcionales de Plantas (TFPs) identificados establecieron una relación directa entre las unidades de uso de suelo y las estrategias funcionales de las especies, mostrando cómo las áreas seminaturales alcanzaron la mayor diversidad funcional (FDis 0.65), destacándose como zonas de transición ecológica. En contraste, las áreas agrícolas reflejaron una simplificación marcada de las comunidades vegetales con menor diversidad funcional (FDis 0.32), mientras que las áreas naturales resaltaron por albergar especies conservativas clave para la estabilidad del ecosistema. Por otro lado, el área foliar (AF) se identificó como un rasgo funcional determinante para las estrategias adaptativas de las plantas frente a los gradientes de uso de suelo, consolidándose como un indicador esencial de la funcionalidad en ecosistemas altoandinos; y, la redundancia funcional observada en especies

como *Barnadesia horrida* y *Berberis carinata* destacó su papel crítico en la estabilidad ecosistémica, garantizando la continuidad de procesos esenciales frente a perturbaciones.

Se recomienda incorporar los TFPs como criterio central en los planes de reforestación, priorizando especies que favorezcan la restauración de funciones ecológicas críticas, como la regulación hídrica, el reciclaje de nutrientes y el fortalecimiento de la resiliencia ecosistémica en áreas degradadas. En particular, se deben seleccionar especies con alta capacidad de adaptación a gradientes de uso del suelo y que posean rasgos funcionales beneficiosos, garantizando así su integración efectiva en los procesos ecosistémicos. Además de fomentar la enseñanza y el estudio de la ecología funcional en ecosistemas altoandinos, promoviendo investigaciones que proporcionen líneas base comparativas sobre la funcionalidad de estos sistemas en distintos niveles de perturbación. Asimismo, se sugiere el uso de técnicas avanzadas, como la teledetección y el análisis multivariado para estudios similares, estas técnicas combinadas con la colaboración interdisciplinaria entre ecólogos, ingenieros y gestores locales, asegurarán que las estrategias de manejo y conservación sean prácticas, efectivas y fundamentadas en evidencia científica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bermeo, D. F. (2010). Determinación y caracterización de tipos funcionales de plantas (TFPs) en bosques secundarios dentro de un gradiente altitudinal y su relación con variables bioclimáticas. CATIE.
- Casanoves, F., Pla, L., Di Rienzo, J., & Díaz, S. (2011). FDiversity: A software package for the integrated analysis of functional diversity. *Methods in Ecology and Evolution*, 2(3), 233–237. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2010.00082.x>
- Cornelissen, J., Lavorel, S., Garnier, E., Diaz, S., Buchmann, N., Gurvich, D., Reich, P., Ter Steege, H., Morgan, H., Van der Heijden, M., Pausas, J. and Poorter, J. (2003). A handbook of protocols for standardized and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian journal of botany*. 51. 335–380.
- Chapin III, F. S., Zavaleta, E. S., Eviner, V. T., Taylor, R. L., Vitousek, P. M., Reynolds, H. L., ... Hobbie, S. E. (2000). Consequences of changing biodiversity. *Nature*, 405(6783), 234–242. <https://doi.org/10.1038/35012241>
- Chávez-Huamán, W. (2011). Diversidad funcional y capacidad de amortiguamiento de los bosques ribereños de la subcuenca Gil González, Departamento Rivas, Nicaragua. Tesis de maestría, Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Chuvieco, E. (2002). Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio. Editorial Ariel.
- Connell, J. H. (1978). Diversity in tropical rain forests and coral reefs. *Science*, 199(4335), 1302–1310. <https://doi.org/10.1126/science.199.4335.1302>
- Delgado Laime, M. (2005). Dinámica de regeneración natural en bosques relictos de Escallonia myrtilloides. UNSAAC.
- Díaz, S. (1997). Plant functional types and ecosystem function in relation to global change. *Journal of Vegetation Science*, 8(4), 463–474. <https://doi.org/10.2307/3237208>
- Díaz, S., Cabido, M., & Casanoves, F. (1999). Functional implications of traits-environment linkages in plants. In E. Weiher & P. Keddy (Eds.), *Ecological Assembly Rules: Perspectives, Advances, Retreats* (pp. 338–362). Cambridge University Press.
- Díaz, S., & Cabido, M. (2001). Vive la différence: Plant functional diversity matters to ecosystem processes. *Trends in Ecology & Evolution*, 16(11), 646–655. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(01\)02283-2](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(01)02283-2)

- Di Rienzo, J. A., Guzmán, A. W., & Casanoves, F. (2008). InfoStat versión 2008. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba.
- Grime, J. P. (1998). Benefits of plant diversity to ecosystems: Immediate, filter and founder effects. *Journal of Ecology*, 86(6), 902–910. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.1998.8650902.x>
- INDECI & PNUD. (2011). Evaluación de riesgos en áreas de alta biodiversidad. Informe técnico, Lima, Perú.
- Jackson, R. B., Mooney, H. A., & Schulze, E. D. (2004). A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(46), 12349–12354. <https://doi.org/10.1073/pnas.0401442101>
- Laliberté, E., & Legendre, P. (2009). A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits. *Ecology*, 91(1), 299–305. <https://doi.org/10.1890/08-2244.1>
- Lavorel, S., McIntyre, S., Landsberg, J., & Forbes, T. D. A. (1997). Plant functional classifications: From general groups to specific groups based on response to disturbance. *Trends in Ecology & Evolution*, 12(12), 474–478. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(97\)01219-6](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(97)01219-6)
- Lavorel, S., Touzard, B., Lebreton, J. D., & Clément, D. (2007). Identifying functional groups for response to disturbance in an abandoned pasture. *Acta Oecologica*, 19(3), 227–240. [https://doi.org/10.1016/S1146-609X\(00\)01050-2](https://doi.org/10.1016/S1146-609X(00)01050-2)
- Matteucci, S., & Colma, A. (1982). Metodología para el estudio de la vegetación. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos.
- Moraes, R., Chávez, M., & Peña, R. (2016). Impacto del uso de suelo en la biodiversidad funcional de los Andes centrales. *Ecología en los Andes*, 28(3), 45–63.
- Olarte, A., & Dollfus, O. (1999). Uso de suelos y pisos ecológicos en la región andina del Perú. Instituto Francés de Estudios Andinos.
- Per-IMA. (2012). Informe técnico: Evaluación del uso del suelo y la vegetación en la cuenca de Lucre, Cusco. Ministerio del Ambiente, Perú.
- Petchey, O. L., & Gaston, K. J. (2002). Functional diversity (FD), species richness, and community composition. *Ecology Letters*, 5(3), 402–411. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2002.00339.x>
- Rao, C. R. (1982). Diversity and dissimilarity coefficients: A unified approach. *Theoretical Population Biology*, 21(1), 24–43. [https://doi.org/10.1016/0040-5809\(82\)90004-1](https://doi.org/10.1016/0040-5809(82)90004-1)
- Salgado-Negret, B. (2007). Tipos funcionales de especies arbóreas en un bosque muy húmedo tropical: Definición, correlación filogenética y relación a la rareza local. CATIE.
- Sarmiento, G. (1986). Ecología de pastizales de alta montaña: Los páramos andinos. *Revista Geográfica*, 15(2), 123–145.
- Walker, B., Kinzig, A., & Langridge, J. (1999). Plant attribute diversity, resilience, and ecosystem function: The nature and significance of dominant and minor species. *Ecosystems*, 2(2), 95–113. <https://doi.org/10.1007/s100219900062>

Presentado: 27/11/2024

Aceptado: 09/12/2024

Publicado: 20/12/2024