

ESTIMACIÓN DE CAPTURA DE CO₂ DEL TILLANDSIAL EN EL DISTRITO DE CIUDAD NUEVA, TACNA - PERÚ

Estimation of CO₂ capture from Tillandsial in the Ciudad Nueva District, Tacna - Peru

Grecia Solange Gómez Cáceres¹, César Nicolás Cáceres Musaja², Leo Ulises Michael Tirado Rebaza³, Alvaro Nilton Herrera Villanueva⁴, Alvaro Jesus Villanueva Limache⁵, Ana Sarai Ayala Quispe⁶, Miltón Raphael Torrico Paucarmayta⁷, Yessenia Danidtzá Gomez Aguilar⁸, Milagros Camila Gómez Cáceres⁹

RESUMEN

El ecosistema *Tillandsial* presenta estabilidad a lo largo del año, sustentada por su dependencia de la humedad proporcionada por la niebla costera. A pesar de proporcionar importantes servicios ecosistémicos, enfrenta amenazas antrópicas que han llevado a su depredación en la ciudad de Tacna, Perú, incluso con la existencia de una ley de protección. El objetivo de esta investigación fue estimar la captura de dióxido de carbono en el distrito de Ciudad Nueva, provincia de Tacna, Perú. Para ello, se empleó el método de medición de cobertura utilizando 23 cuadrantes de 100 m², con el fin de determinar el porcentaje total de cobertura de las especies y posteriormente estimar la captura de CO₂ mediante un analizador portátil de CO₂ EGM-5. Los resultados indicaron que la cobertura total de *Tillandsias* sp. en Ciudad Nueva fue del 53.65%, de la cual el 19.91% correspondió a biomasa con capacidad de captación de CO₂. Las mediciones realizadas con el analizador portátil de CO₂ revelaron que el ecosistema *Tillandsial* del distrito de Ciudad Nueva captura aproximadamente 831.09 toneladas de CO₂ al año.

Palabras clave: amenazas antrópicas, ecosistema *Tillandsial*, biomasa, cobertura vegetal.

ABSTRACT

The tillandsial ecosystem is a stable ecosystem *Tillandsial* throughout the year and depends on coastal fog for its survival. Despite providing important ecosystem services, it faces anthropogenic threats that have led to its depredation in the city of Tacna, Peru, even with the existence of a protection law. The objective of this research was to estimate carbon dioxide sequestration in the district of Ciudad Nueva, province of Tacna, Peru. For this purpose, the cover measurement method was employed using 23 quadrats of 100 m², in order to determine the total percentage of species cover and subsequently estimate CO₂ capture using a portable CO₂ analyzer (EGM-5). The results indicated that the total cover of tillandsias sp. in Ciudad Nueva was 53.65%, of which 19.91% corresponded to live biomass with CO₂ capture capacity. Measurements made with the Portable CO₂ Analyzer revealed that the tillandsial ecosystem of the Ciudad Nueva district captures approximately 831.09 tons of CO₂ per year.

Keywords: anthropic threats, ecosystem *Tillandsial*, biomass, vegetation cover.

¹ Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Perú.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0997-6854>. grecia.caceres0997@gmail.com

² Escuela Profesional de Biología-Microbiología, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Perú.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5685-3315>. cesar.caceresmusaja@gmail.com

³ Docente Universitario, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Universidad Privada de Tacna, Perú.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6599-8866>. leotiradorebaza@gmail.com

⁴ Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Perú.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4186-9269>. aherrerav@unjbg.edu.pe

⁵ Escuela Profesional de Derecho, Universidad Privada de Tacna, Perú.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8292-3600>. dreyfusco@gmail.com

⁶ Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Perú.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9065-1418>. saraiaayalaq15@gmail.com

⁷ Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Perú.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7435-7544>. mtorricop@gmail.com

⁸ Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Perú.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8468-1877>. ygomeza@unjbg.edu.pe

⁹ Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Perú.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5680-9728>. milagrosgc29@gmail.com

INTRODUCCIÓN

El Tillandsial es un ecosistema singular dominado por plantas del género *Tillandsia*, bromelias terrestres adaptadas a ambientes áridos y semiáridos. Estas especies carecen de raíces funcionales y presentan tricomas especializados en tallos y hojas, los cuales permiten la captación de humedad atmosférica y ofrecen protección frente a la radiación solar (Benzing, 1998; Haslam et al., 2003). En la ciudad de Tacna, particularmente en el distrito de Ciudad Nueva, se encuentran las especies *Tillandsia werdermannii*, *T. purpurea* y *T. landbeckii* (Pauca-Tanco et al., 2020). De ellas, *T. werdermannii* es una especie endémica y se encuentra clasificada como "en peligro" de extinción según el Decreto Supremo N° 043-2006-AG. La supervivencia de estos ecosistemas depende en gran medida de la humedad aportada por la niebla costera (Pinto et al., 2006), lo que los convierte en sistemas particularmente frágiles y vulnerables a los efectos del cambio climático.

La importancia ecológica del Tillandsial radica en los diversos servicios ecosistémicos que provee. Entre ellos destacan la captura de dióxido de carbono (CO₂) mediante la fotosíntesis, la producción de oxígeno, la regulación del microclima local, la mejora de la calidad del aire, el soporte a la biodiversidad y el refugio para fauna silvestre (Lazo, 2011; Koch et al., 2020). Asimismo, estas comunidades vegetales funcionan como bioindicadores del cambio climático debido a su sensibilidad a las variaciones ambientales. La capacidad de captura de CO₂ en las plantas depende de factores como la edad, el tamaño y la densidad poblacional (Zavala, 2021) y resulta fundamental en un contexto global donde las emisiones de gases de efecto invernadero siguen en aumento. En 2023, estas emisiones alcanzaron los 57.1 GtCO₂, con un incremento del 1.3% respecto al año anterior (United Nations Environment Programme, 2024), evidenciando la urgencia de conservar ecosistemas que actúan como sumideros naturales de carbono.

Para cuantificar el servicio de captura de CO₂ en el ecosistema Tillandsial, es necesario estimar la biomasa vegetal a partir de la cobertura del área ocupada por la biomasa (Ministerio del Ambiente de Perú, 2015). Posteriormente, se utiliza el analizador portátil de CO₂ EGM-5 (PP SYSTEMS, 2021), un equipo que permite medir directamente la concentración de CO₂ en las muestras de Tillandsias. No obstante, este ecosistema se encuentra amenazado por la acumulación de residuos sólidos, el

tránsito vehicular y el uso inadecuado de las plantas con fines simbólicos (Schulz et al., 2011), así como por posibles impactos derivados del cambio climático (Pinto et al. 2006).

Considerando la presencia predominante de biomasa viva y su fisiología adaptada al estrés hídrico, se considera que el ecosistema Tillandsial de Ciudad Nueva cumple una función ecológica relevante como sumidero de carbono, asociada directamente a su cobertura de vegetación activa.

En ese sentido, la presente investigación tiene como objetivo estimar la captura de dióxido de carbono del ecosistema Tillandsial, ubicado en el distrito de Ciudad Nueva, en la ciudad de Tacna, Perú. Este estudio busca aportar al conocimiento ecológico de estas comunidades vegetales y generar información relevante para su conservación como sumideros de carbono.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación de la zona de estudio

La presente investigación se llevó a cabo en el distrito de Ciudad Nueva con una extensión de 3 542.79 ha, con coordenadas 17° 59' 01" S y 70° 14' 08" O, una altitud media de 650 m s.n.m., una temperatura promedio anual de 17.50 °C, una temperatura mínima promedio de 12.50 °C y una temperatura máxima promedio 23.50 °C (Gerencia de Planeamiento, Presupuesto y Racionalización, 2020).

Metodología

La técnica de la presente investigación fue la medición de cobertura vegetal y estimación de captura de CO₂, el instrumento fue el Analizador Portátil de CO₂ EGM-5 (PP SYSTEMS, 2021).

La población de estudio del Tillandsial en el distrito de Ciudad Nueva abarcó un área total de 3 542.79 hectáreas. Para determinar el tamaño de muestra, se aplicó una fórmula basada en un error de muestreo del 15% y un coeficiente de variación (CV) del 35%. La elección de estos parámetros se fundamenta en los criterios metodológicos propuestos por Carrera et al. (2002), quienes indican que un CV del 35% es aceptable en estudios ecológicos de cobertura vegetal en zonas áridas o semiáridas, debido a la alta heterogeneidad natural del paisaje. Asimismo, un error de muestreo del 15% representa un compromiso

razonable entre la precisión estadística deseada y la factibilidad operativa del trabajo de campo, especialmente cuando se evalúan superficies extensas con acceso limitado, como en el caso del ecosistema Tillandsial de Ciudad Nueva. La aplicación de estos valores se muestra en la Ecuación 1.

$$n = \frac{(t_{\alpha/2,gl})^2 * (CV\%)^2}{(E\%)^2 + \frac{(t_{\alpha/2,gl})^2 * (CV\%)^2}{N}} \quad (1)$$

Dónde: n = número de unidades de muestreo o parcelas; $t_{\alpha/2,gl}$ = 2 (al 95% de probabilidad); CV% = coeficiente de variabilidad 35%; E% = error de muestreo igual a 15%; N = tamaño de la población (número total de parcelas).

Se realizó una estimación inicial del tamaño de muestra, la cual fue posteriormente refinada utilizando el valor de $t_{\alpha/2,gl}$ obtenido de la tabla de la distribución t de Student, correspondiente a los grados de libertad de la primera estimación. Este procedimiento fue iterado sucesivamente hasta que el tamaño de muestra calculado se mantuvo constante entre iteraciones, garantizando así la convergencia del valor final. El tamaño de la muestra se efectuó de la siguiente manera:

$$N = \frac{\text{Área total}}{\text{Área de la parcela}}$$

Reemplazando:

$$N = \frac{35\,427\,900\,m^2}{100\,m^2} = 354\,279$$

Primer cálculo:

$$n = \frac{(2)^2 * (35)^2}{(15)^2 + \frac{(2)^2 * (35)^2}{354\,279}}$$

$$n = 21.776439 \cong 22 \text{ parcelas}$$

Segundo cálculo:

$$t_{\alpha/2,21} = 2.080$$

$$n = \frac{(2.080)^2 * (35)^2}{(15)^2 + \frac{(2.080)^2 * (35)^2}{354\,279}}$$

$$n = 23.553278 \cong 24 \text{ parcelas}$$

Tercer cálculo:

$$t_{\alpha/2,23} = 2.069$$

$$n = \frac{(2.069)^2 * (35)^2}{(15)^2 + \frac{(2.069)^2 * (35)^2}{354\,279}}$$

$$n = 23.304832 \cong 23 \text{ parcelas}$$

Cuarto cálculo:

$$t_{\frac{\alpha}{2},22} = 2.074$$

$$n = \frac{(2.074)^2 * (35)^2}{(15)^2 + \frac{(2.074)^2 * (35)^2}{354\,279}}$$

$$n = 23.417599 \cong 23 \text{ parcelas}$$

Selección de cuadrantes al azar

Se usó la metodología de elección de cuadrantes al azar usando el Software ArcGIS 10.8 (ArcMAP, 2020). Primero, se delimitó el área del Tillandsial en el distrito de Ciudad Nueva y se convirtió en un shapefile en formato polígono. Posteriormente, en ArcToolbox, se seleccionó la opción Data Management Tools, Sampling, y Create Fishnet. En el campo Output Feature Class, se añadió una nueva capa denominada "malla". En el campo Template Extent, se seleccionó la capa del Tillandsial de Ciudad Nueva. Para generar los cuadrantes de 100 m², se configuraron los valores de Cell Size Width y Cell Size Height en 10. En la opción Target layer(s), se seleccionó la capa "malla", y en Source layer se eligió el polígono de Ciudad Nueva. Luego, se seleccionaron los cuadrantes dentro del área de evaluación, y mediante la opción Switch selection de la capa "malla", se eliminaron los cuadrantes fuera del área de interés.

Para la creación de puntos de muestreo aleatorios, se utilizó nuevamente ArcToolbox y se seleccionó la opción Create Random Points, donde se especificó el número de 23 cuadrantes a generar. El resultado final se encuentra en la Figura 1, luego se exportó al programa Google Earth para su visualización y análisis.

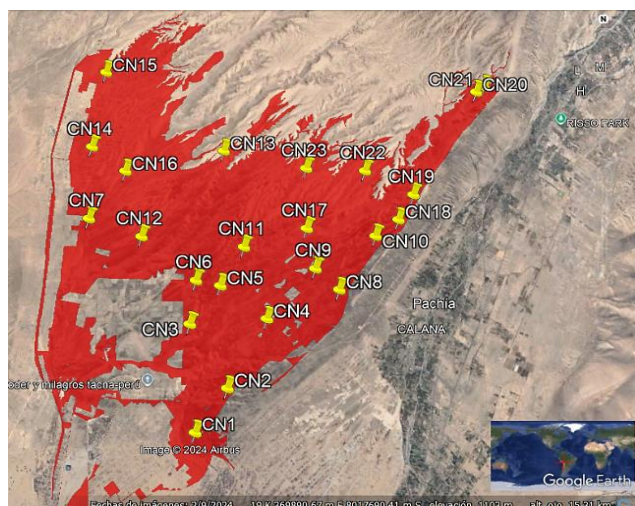


Figura 1. Puntos de medición de cuadrantes para el distrito de Ciudad Nueva.

Medición de la cobertura de las especies del género *Tillandsia*

El tamaño de la unidad muestral de los cuadrantes fue de 100 m², la cobertura se determinó midiendo el largo y ancho de cada agrupación de las especies del género *Tillandsia*, diferenciando el porcentaje de biomasa y necromasa, cuyo resultado se extrapola en toda la superficie de estudio (Ministerio del Ambiente de Perú, 2015).

Medición de la estimación de la captura de CO₂

El muestreo para la estimación de la captura de CO₂ se realizó con seis repeticiones por cada cuadrante de 100 m² de evaluación. En la Figura 2 se presenta el modelo del cuadrante a medir, se calculó un valor promedio representativo de dichas mediciones, a continuación, se estimó la cobertura efectiva de biomasa de *Tillandsia* convertido en metros cuadrados. La captura total de CO₂ en cada cuadrante se determinó multiplicando la tasa promedio de captura (g CO₂ m⁻² h⁻¹) por la superficie cubierta por la biomasa (m²), obteniendo un promedio general para la concentración de CO₂ por cuadrante (g CO₂ m⁻² h⁻¹), la cobertura de biomasa (m²) y la captura total de CO₂ (g CO₂ h⁻¹). El valor promedio final de captura de CO₂ se empleó para estimar la captura total de CO₂ en toneladas por hora, día, mes y año, considerando la cobertura final de biomasa del *Tillandsia*.

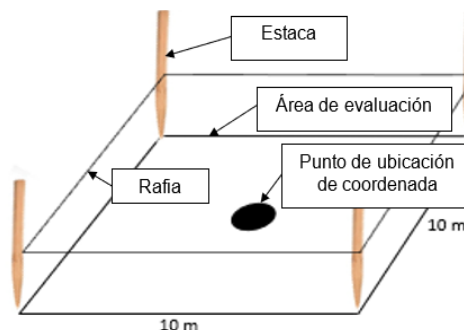


Figura 2. Área del cuadrante de evaluación.

Se usó el analizador portátil de CO₂ EGM-5 mediante el siguiente procedimiento:

El instrumento fue previamente cargado hasta alcanzar el 100% de batería, se encendió mediante el interruptor principal y se verificaron tanto el estado de la batería como el nivel de soda cáustica, el cual debía estar al 98% para asegurar un funcionamiento óptimo. Cada vez que la columna de soda cáustica se encontraba por debajo del 20%, se reemplazaba.

Posteriormente, se insertó una unidad USB en el puerto correspondiente para el almacenamiento de los datos y se conectaron los tubos de entrada (GAS IN) y salida (GAS OUT) en sus respectivas posiciones. El instrumento se dejó en reposo durante un periodo de 10 a 15 minutos para completar el proceso de calentamiento y estabilización de los sensores. Al finalizar este proceso, comenzaron a visualizarse en pantalla los valores iniciales de concentración de CO₂.

Desde el menú principal del instrumento Main, se accedió a la opción Processes para configurar los parámetros de operación, en función del tipo de cámara utilizada. En este caso, se utilizó la cámara blanca (CPY), registrando los valores correspondientes al volumen y área de la cámara y estableciendo un tiempo de medición de 120 segundos por punto, conforme a lo indicado en el manual técnico del instrumento, se realizó 6 repeticiones de medición por cuadrante.

Cada punto de muestreo fue identificado con un número correlativo. Al iniciar la medición, el instrumento mostró en pantalla los valores de CO₂ en tiempo real junto con una gráfica de evolución. Una vez finalizado el tiempo de medición, se seleccionó la opción "New CPY" para guardar los datos y proceder con el siguiente punto.

Todos los registros fueron almacenados automáticamente en la unidad USB para su posterior análisis.

Cálculo para la obtención de dióxido de carbono

Para obtener el flujo de CO₂ en masa/unidad de superficie/unidad de tiempo se realizó la siguiente conversión usando la fórmula 2 (PP SYSTEMS, 2021):

$$F_{CO_2}(gm^{-2}h^{-1}) = \frac{dC}{dT} \frac{\mu mol}{mol \cdot s} \cdot \frac{P}{1013} \cdot \frac{273}{273 + T_{air}} \cdot \frac{44,009 \text{ g}}{22,414 \text{ g}} \cdot \frac{V \text{ m}^3}{A \text{ m}^2} \cdot \frac{mol}{10^6 \mu mol} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{h} \cdot \frac{10^3 L}{m^3} \quad (2)$$

Dónde: $\frac{dC}{dT}$ = ecuación de ajuste lineal y con compensación de H₂O; $\frac{P}{1013}$ = corrección para la presión barométrica con P medida en mbar por el EGM-5; $\frac{273}{273+T_{air}}$ = corrección para la temperatura del aire con T_{air} introducida por el usuario en °C; $\frac{44,009 \text{ g}}{22,414 \text{ g}}$ = volumen molar y la constante del gas ideal; $\frac{V \text{ m}^3}{A \text{ m}^2}$ = volumen de la cámara y la superficie del suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se puede evidenciar la cobertura total y la cobertura de biomasa para la medición de captura de CO₂ para el Tillandsial ubicado en el distrito de Ciudad Nueva, ubicado en la ciudad de Tacna, Perú.

Tabla 1. Cobertura del Tillandsial del distrito de Ciudad Nueva, ciudad de Tacna, Perú.

Cuadrante	Cobertura total (%)	Cobertura de biomasa (%)
CN1	68.64	26.12
CN2	51.58	21.78
CN3	34.85	14.15
CN4	64.49	23.82
CN5	60.59	24.96
CN6	45.34	17.74
CN7	38.69	12.76
CN8	67.89	26.02
CN9	62.89	25.28
CN10	64.39	23.04
CN11	66.12	28.03
CN12	48.96	13.31
CN13	31.76	7.11
CN14	40.79	13.86
CN15	55.32	21.84
CN16	28.29	8.54
CN17	63.00	23.22
CN18	74.24	28.81
CN19	66.37	24.76
CN20	49.95	16.71
CN21	43.79	14.56
CN22	65.08	27.48
CN23	40.95	13.97
Promedio	53.65	19.91

En la Tabla 2, se evidencia que la cobertura de biomasa para el distrito de Ciudad Nueva fue de 705.37 hectáreas.

Tabla 2. Área final para la estimación de la captura de CO₂.

Distrito	Área inicial (ha)	Cobertura total		Cobertura de biomasa	
		%	ha	%	ha
Ciudad Nueva	3 542.79	53.65	1 900.71	19.91	705.37

En la Tabla 3, se puede evidenciar que la estimación de la captura de CO₂ tiene un promedio por cuadrante de 2.69 g CO₂ h⁻¹.

Tabla 3. Estimación de captura de CO₂ por cuadrante en el distrito de Ciudad Nueva.

Cuadrante	Concentración de CO ₂ (g CO ₂ m ⁻² h ⁻¹)	Cobertura para la captura de CO ₂ (m ²)	Captura de CO ₂ (g CO ₂ h ⁻¹)
CN1	0.17	26.12	4.44
CN2	0.16	21.78	3.48
CN3	0.04	14.15	0.57
CN4	0.15	23.82	3.57
CN5	0.14	24.96	3.49
CN6	0.15	17.74	2.66
CN7	0.04	12.76	0.51
CN8	0.17	26.02	4.42
CN9	0.16	25.28	4.04
CN10	0.15	23.04	3.46
CN11	0.16	28.03	4.48
CN12	0.05	13.31	0.67
CN13	0.05	7.11	0.36
CN14	0.04	13.86	0.55
CN15	0.05	21.84	1.09
CN16	0.05	8.54	0.43
CN17	0.17	23.22	3.95
CN18	0.15	28.81	4.32
CN19	0.17	24.76	4.21
CN20	0.14	16.71	2.34
CN21	0.14	14.56	2.04
CN22	0.16	27.48	4.40
CN23	0.17	13.97	2.37
Promedio	0.12	19.91	2.69

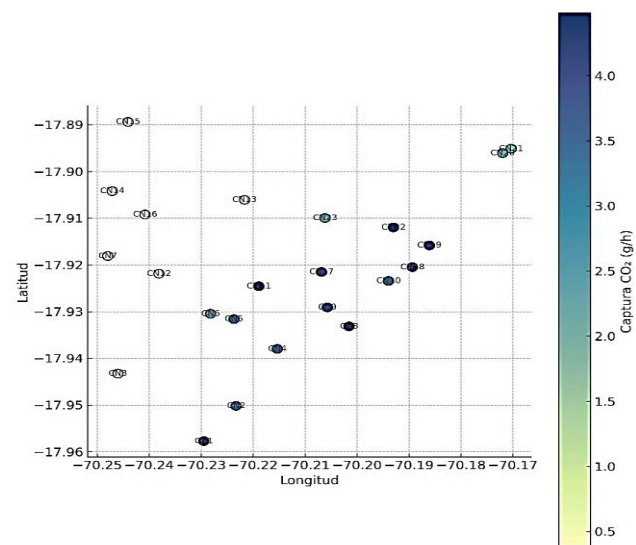


Figura 3. Distribución espacial de la captura de CO₂ (g h⁻¹) por cuadrante en el ecosistema Tillandsial del distrito de Ciudad Nueva, Tacna-Perú.

La Figura 3 muestra la distribución espacial de la captura horaria de CO₂ en 23 cuadrantes evaluados del ecosistema Tillandsial de Ciudad Nueva. Se evidencia una variabilidad notable entre los cuadrantes, con valores que oscilan entre 0.36 y

4.48 g CO₂ h⁻¹. Las zonas con mayor captura se representan en tonos azul oscuro, mientras que las de menor captura aparecen en colores claros.

Esta heterogeneidad se asocia principalmente a diferencias en la cobertura de biomasa viva entre cuadrantes, ya que aquellos con mayor densidad de las especies del género *Tillandsia* presentan una captura más elevada. A pesar de que estas especies poseen metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM), caracterizado por una tasa fotosintética reducida en comparación con otras vías metabólicas (C3 y C4), su capacidad para fijar carbono en ambientes áridos sigue siendo significativa.

Estos resultados evidencian que, aunque las *Tillandsias* presentan una menor eficiencia horaria de captura de dióxido de carbono, su amplia cobertura espacial y su adaptación a condiciones extremas les permite actuar como sumideros naturales de carbono, con un rol ecológico importante en zonas desérticas.

En la Tabla 4, se puede observar la estimación de la captura para el Tillandsial del distrito de Ciudad Nueva, ciudad de Tacna, Perú.

Tabla 4. Estimación de captura de CO₂ para el Tillandsial del distrito de Ciudad Nueva.

Distrito	Cobertura de biomasa (ha)	Captura de CO ₂ total (t CO ₂ h ⁻¹)	Captura de CO ₂ total (tCO ₂ día ⁻¹)	Captura de CO ₂ total (t CO ₂ mes ⁻¹)	Captura de CO ₂ total (t CO ₂ año ⁻¹)
Ciudad Nueva	705.37	0.10	2.31	69.26	831.09

En la Tabla 4, se evidencia que el ecosistema Tillandsial del distrito de Ciudad Nueva, posee una capacidad de captura de 831.09 t CO₂ año⁻¹, las cuales el ecosistema posee una capacidad de capturar dióxido de carbono, comportándose como sumideros naturales de carbono (Zavala, 2021). Este valor resulta considerablemente mayor que la estimación registrada en el Tillandsial Piedra Campana, ubicado en la ciudad de Lima en Perú, con un valor de 106.03 t CO₂ (Arevalo, 2018), y también supera la captura del Tillandsial en Lomas Arrojadero, en los distritos de Inclán y Locumba de la provincia de Tacna, que alcanzó 92.30 t CO₂, sin embargo, es notablemente inferior a los 224 788.28 t CO₂ estimados en el Tillandsial del Cerro Intiorko, provincia de Tacna (Chino, 2019), lo que se explica por la diferencia de extensión del área evaluada, ya que en dicho estudio no se consideró el factor de cobertura de las especies del género *Tillandsia*.

Respecto al promedio de captura de CO₂ por cuadrante en Ciudad Nueva, se obtuvo un valor de 0.12 g CO₂ m⁻² h⁻¹ inferior a la investigación en turberas de montaña en los Andes ecuatorianos, donde los sitios pastoreados capturaban 0.69 g CO₂ m⁻² h y los no perturbados hasta 1.25 g CO₂ m⁻² h⁻¹ (Sánchez et al., 2017). Asimismo, la especie *Distichia* presentó una captura de 4.5 g CO₂ m⁻² día⁻¹ y para la especie *Oreobolus* fue de 2.5 g CO₂ m⁻² h⁻¹ en las turberas de la Cordillera Blanca del Perú (Planas-Clarke et al., 2020).

Las especies del género *Tillandsia* presentes en el ecosistema evaluado poseen un metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM), lo cual influye directamente en su eficiencia fotosintética y, por ende, en su capacidad de captura de CO₂ (Geydan y Melgarejo, 2005). A diferencia de los metabolismos C3 y C4, el metabolismo CAM se caracteriza por una apertura estomática nocturna que permite captar CO₂ durante la noche y almacenarlo en forma de ácido málico, para luego utilizarlo en la fotosíntesis durante el día, mientras los estomas permanecen cerrados. Este mecanismo es altamente eficiente en la conservación del agua, lo cual representa una ventaja adaptativa en ambientes áridos como el de Ciudad Nueva (Rundel y Dillon, 1998). Sin embargo, esta eficiencia hídrica se logra a costa de una tasa reducida de fijación de

carbono, ya que la cantidad de CO₂ que puede ser captada y almacenada durante la noche es limitada (González y Chueca, 2010).

Este rasgo fisiológico explica por qué, a pesar de tener una cobertura vegetal considerable, los Tillandsiales presentan tasas de captura horaria de CO₂ menores en comparación con otros ecosistemas como turberas andinas o pastizales húmedos. No obstante, su función como sumidero de carbono no debe subestimarse: la captura puede ser más lenta, pero es constante, estable y ocurre en condiciones en que pocas otras especies podrían sobrevivir o contribuir significativamente al secuestro de carbono. Esta combinación de resistencia ambiental y captura sostenida convierte a los Tillandsiales en componentes clave en los ecosistemas áridos del sur peruano, con un papel importante en estrategias de mitigación del cambio climático.

CONCLUSIONES

La cobertura total para el ecosistema Tillandsial del distrito de Ciudad Nueva fue de 53.65% y la cobertura de la biomasa fue de 19.91% lo que influye directamente en la capacidad de captura de dióxido de carbono. El Tillandsial del distrito de Ciudad Nueva, tuvo una captura de 831.09 t CO₂ año⁻¹, aunque la tasa de captura de dióxido de carbono fue baja, su importancia ambiental sigue siendo significativa debido a los numerosos servicios ecosistémicos que presenta, lo que lo convierte en un área estratégica para la conservación de la biodiversidad. Por ello, la preservación del Tillandsial de Ciudad Nueva, es fundamental para garantizar la sostenibilidad ambiental de la provincia de Tacna y para contribuir a los esfuerzos globales de mitigación del cambio climático.

BIBLIOGRAFÍA

- ArcMAP. 2020. Seleccionar entidades de parcela (Parcela)-ArcGIS | Documentación (en línea). Disponible en <https://arcgis.com/es/app/3.3/tool-reference/parcel/select-parcel-features.htm>
- Arevalo, JR. 2018. Estimación de carbono almacenado por *Tillandsia latifolia* en el Tillandsial Piedra Campana (Lima, Perú) (en línea). Universidad Científica del Sur. Disponible en <https://repositorio.cientifica.edu.pe/handle/20.500.12805/540>

- Benzing, D. 1998. Vulnerabilities of tropical forests to climate change: the significance of resident epiphytes (en línea). *Climatic Change* 39:519-540. Disponible en <https://doi.org/10.1023/A:1005312307709>
- Carreram, F; Kanninen, M; Kleinn, C; Louman, B; Mejía, A; Morales, D; Núñez, LA; Ortiz, E; Quiros, D; Segura, MA; Stanley, S; Villalobos, R. 2002. Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central (en línea). s.l., Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Disponible en <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/2600>
- Chino, EA. 2019. Evaluación del servicio ambiental de captura y almacenamiento de carbono en la comunidad de Tillandsia (Bromeliaceae) en Las Pampas de Cerro Intiorko en el Provincia de Tacna, 2016 (en línea). Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Disponible en <http://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/UNJBG/3719>
- Gerencia de Planeamiento, Presupuesto y Racionalización. 2020. Memoria Anual 2019 - Distrito Ciudad Nueva. s.l., Municipalidad Distrital de Ciudad Nueva.
- Geydan, TD; Melgarejo, LM. 2005. Metabolismo ácido de las crasuláceas. *Acta Biológica Colombiana* 10(2):3-16.
- González, JL; Chueca, A. 2010. C4 y CAM. Características generales y uso en programas de desarrollo de tierras áridas y semiáridas. Homenaje al Dr. Julio López Gorgé (en línea). s.l., Consejo Superior de Investigaciones Científicas (España). Disponible en <https://digital.csic.es/handle/10261/29768>
- Haslam, R; Borland, A; Maxwell, K; Griffiths, H. 2003. Physiological responses of the CAM epiphyte *Tillandsia usneoides* L. (Bromeliaceae) to variations in light and water supply (en línea). *Journal of Plant Physiology* 160(6):627-634. Disponible en <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00970>
- Koch, MA; Stock, C; Kleinpeter, D; del Río, C; Osses, P; Merklinger, FF; Quandt, D; Siegmund, A. 2020. Vegetation growth and landscape genetics of *Tillandsia lomas* at their dry limits in the Atacama Desert show fine-scale response to environmental parameters (en línea). *Ecology and Evolution* 10(23):13260-13274. Disponible en <https://doi.org/10.1002/ece3.6924>
- Lazo, RS. 2011. Valoración biológica, física y geográfica de la hierba Siempre Viva *Tillandsia werdermannii* para su conservación en la Región Tacna, 2010 (en línea). Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Disponible en <http://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/UNJBG/674>
- Ministerio del Ambiente de Perú. 2015. Guía de inventario de la flora y vegetación - Informes y publicaciones - Ministerio del Ambiente - Plataforma del Estado Peruano (en línea). Disponible en <https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/2683-guia-de-inventario-de-la-flora-y-vegetacion>
- Pauc-Tanco, GA; Villasante Benavides, JF; Villegas Paredes, L; Luque Fernandez, CR; Quispe Turpo, J del P. 2020. Distribution and characterization of the communities of *Tillandsia* (Bromeliaceae) in southern Peru and their relationship with altitude, slope and orientation (en línea). *Ecosistemas* 29(3):1-8. Disponible en <https://doi.org/10.7818/ECOS.2035>
- Pinto, R; Barria, I; Marquet, PA. 2006. Geographical distribution of *Tillandsia lomas* in the Atacama Desert, northern Chile (en línea). *Journal of Arid Environments* 65(4):543-552. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.08.015>
- Planas-Clarke, AM; Chimner, RA; Hribljan, JA; Lilleskov, EA; Fuentealba, B. 2020. The effect of water table levels and short-term ditch restoration on mountain peatland carbon cycling in the Cordillera Blanca, Peru (en línea). *Wetlands Ecology and Management* 28(1):51-69. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11273-019-09694-z>
- PP SYSTEMS. 2021. EGM-5, Portable CO2 Gas Analyzer, Operation Manual Version 1.10. U.S.A., PP Systems. 135 p.
- Rundel, P; Dillon, M. 1998. Ecological patterns in the Bromeliaceae of the Lomas formations of Coastal Chile and Peru (en línea). *Plant Systematics and Evolution - Plant Syst Evol* 212:261-278. Disponible en <https://doi.org/10.1007/BF01089742>
- Sánchez, ME; Chimner, RA; Hribljan, JA; Lilleskov, EA; Suarez, E. 2017. Carbon dioxide and methane fluxes in grazed and undisturbed mountain peatlands in the Ecuadorian Andes (en línea). Disponible en <https://doi.org/10.19189/MaP.2017.OMB.277>
- Schulz, N; Aceituno, P; Richter, M. 2011. Phytogeographic divisions, climate change and plant dieback along the coastal desert of Northern Chile (en línea). *Erdkunde* 65:169-187. Disponible en <https://doi.org/10.2307/23030664>
- United Nations Environment Programme. 2024. Emissions Gap Report 2024: No more hot air, with a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments (en línea). Disponible en <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2024>
- Zavala Solórzano, JW. 2021. Captura y almacenamiento de carbono en distintas edades del cultivo de cacao bajo sistemas agroforestales de Tingo María-UNHEVAL (en línea). s.l., s.e. Disponible en <https://www.unheval.edu.pe/portal/captura-y-almacenamiento-de-carbono-en-distintas-edades-del-cultivo-de-cacao-bajo-sistemas-agroforestales-de-tingo-maria/>

Artículo recibido en: 16 de abril del 2025
Aceptado en: 10 de agosto del 2025