

FUNCIONALIDAD AGRO-ECOSISTÉMICA PARA EL MEJORAMIENTO DEL PAISAJE RURAL

CASO: GHANA Y COSTA RICA

Melissa Abarca Ramírez¹, Sergio Abarca Monge², Zhenyu Wang³

RESUMEN

Funcionalidad agro-ecosistémica para el mejoramiento del paisaje rural. Caso Ghana y Costa Rica. Se seleccionaron 16 y 14 sitios con estaciones meteorológicas de Ghana y Costa Rica respectivamente donde la precipitación máxima fuera cercana a los 2000 mm anuales. Se tomaron seis variables: precipitación (P) acumulada en mm/año; humedad relativa (HR) en % y temperatura (T) (°C), biotemperatura (BIOT), evapotranspiración potencial (EVTp) y relación EVTp/P. Se concluyó que los ecosistemas Costa Rica tienden a ser más sensibles a factores biológicos, como el caso de la introducción transfronteriza, involuntaria o no de especies nuevas. Mientras en el caso de Ghana sus ecosistemas tienden a ser sensibles en los factores abióticos como la reducción de agua en el suelo y el incremento de temperatura, con menos posibilidad de establecimiento de una gran cantidad de especies introducidas.

Palabras clave: Ghana, Costa Rica, agroecosistemas, zonas de vida, nativizadas.

ABSTRACT

Agro-ecosystem functionality for the improvement of rural landscapes. Case of Ghana and Costa Rica. Sixteen and fourteen sites were selected with meteorological stations in Ghana and Costa Rica, respectively, where the maximum annual precipitation was close to 2000 mm. Six variables were measured: annual accumulated precipitation (P) in mm/year; relative humidity (RH) in %; temperature (T) (°C); biotemperature (BIOT); potential evapotranspiration (ETP); and the ETP/P ratio. It was concluded that Costa Rican ecosystems tend to be more sensitive to biological factors, such as the cross-border introduction, whether intentional or not, of new species. In the case of Ghana, its ecosystems tend to be more sensitive to abiotic factors, such as soil water reduction and temperature increase, with less likelihood of establishment for a large number of introduced species.

Keywords: Ghana, Costa Rica, agro-ecosystems, life zones, naturalized species.

1 Universidad de Costa Rica, UCR. ORCID: 0000-0002-6088-6371. Correo melissa.abarcaramirez@ucr.ac.cr

2 Instituto Nacional de Transferencia en Tecnología Agropecuaria. INTA. ORCID: 0000-0001-8953-1243. Correo sabarcam@inta.go.cr

3 Georgetown Preparatory S. ORCID: 0009-0007-8172-5861. Correo zhwang@gprep.org

INTRODUCCIÓN

En la restauración de paisajes debe tomarse en cuenta el acervo de recursos existentes de cada región y el conocimiento local de sus pobladores como base para proponer cambios en función de la ciencia y la técnica. Los análisis geo-prospectivos que toman en cuenta lo anterior son un buen insumo en el diseño de proyectos de restauración de paisajes. Los elementos a restaurar deberán ser desarrollados y validados *in situ* junto con los productores agropecuarios. En este contexto se hace una comparación de elementos ecológicos comunes entre Ghana y Costa Rica, pero con dinámicas socioeconómicas contrastantes. De acuerdo con la definición teórica amplia, Newton y Tejedor (2011) la restauración de paisajes es el proceso por el cual un paisaje dañado o

degradado es restaurado a un estado en el que pueda cumplir con una variedad de funciones ecológicas, sociales y económicas.

Desde una perspectiva ecológica, de acuerdo con el esquema de zonas de vida de Holdridge (1978) Costa Rica presenta una mayor cantidad de zonas, en especial en ecosistemas con mayor humedad que Ghana. Sin embargo, la costa pacífica norte de Costa Rica aproximadamente 25 % de su territorio, mantiene una estacionalidad climática con un periodo de mínima precipitación definido; al que se denomina como época seca, con la misma tendencia anual que en Ghana, en ambos casos con precipitaciones acumuladas anuales cercanas a los 2000 mm anuales.

Cuadro 1. Indicadores socioeconómicos del Banco Mundial (2024) Ghana y Costa Rica.

Indicador	Ghana	Costa Rica
Área total (Km ²)	238.533	51.100
PIB (\$/per capita)	2.238	16.595
Densidad de población (hab/Km ²)	134	102
Área Forestal (% del país)	35	59
Emisiones de GEI (CO ₂ ton/per capita)	0.6	1.4
Esperanza de vida (años)	64	77

En Costa Rica la restauración de paisajes ha generado propuestas que van desde la reforestación con plantaciones en bloques de una sola especie exótica introducida, con poco o ningún rol ecosistémico (de Camino y Budowski 1995) hasta nuevos agro-ecosistemas con roles ecosistémicos y socioeconómico adecuados, como es la combinación de árboles nativos con especies de pastos nativizados tipo C4 procedentes de África (Morantes y Renjifo 2018). Mientras en Ghana un árbol americano como el cacao se puede visualizar como nativizado, siendo una arbustiva C3 dentro de un ecosistema de bosque seco (Barvo et al 2011; Jagoret et al 2020). Por otra, parte según Crutzen (2002) en el Antropoceno la actividad humana ha llegado a ser la fuerza dominante que impulsa los cambios en la Tierra, alterando la mayoría de los hábitats, mediante la contaminación y el cambio climático entre otros aspectos, siendo la causa principal de la

extinción de especies y el rompiendo del ciclo natural de nutrientes. No obstante, estos ecosistemas de paisajes de árboles con pasturas en la región más tropical de América se deben planificar técnicamente ya que no son del todo autóctonos. Por ejemplo en el Caribe de Costa Rica Velkamp (1994) encontró una baja productividad de las pasturas mal manejadas de especies consideradas nativizadas con pérdidas significativas de carbono del suelo posterior a la deforestación. Dentro de este contexto, para llevar a cabo procesos de restauración en una región, el primer paso es salvaguardar los ecosistemas naturales como bancos de biodiversidad (Allan et al 2022). En segundo lugar, diseñar sistemas de producción agropecuaria donde las especies introducidas se acoplen al conjunto de especies naturales de una zona de vida y generen roles ecosistémicos, que permiten mejorar la resiliencia del conjunto de especies que conforman el agro-ecosistema

ante los efectos detrimentales del antropoceno. Esto permitiría que las personas continúen con sus medios de producción de tal forma que les provean una vida digna de desde el punto de vista socioeconómico (Abarca-Monge 2016). En este sentido los sistemas agroforestales como mezclas de especies nativizadas y originarias en diferentes arreglos temporal y espacial han sido una solución adecuada, generando servicios ecosistémicos y manteniendo los medios de vida de las personas en el medio rural tropical (Montagnini *et al* 2015).

En la era del Antropoceno donde se está dando un aumento de CO₂, es de esperar cambios en las características de la vegetación y que algunas plantas aumenten en forma diferenciada su productividad impulsando su competitividad en los hábitats, con consecuencias para la estructura de la comunidad vegetal (paisajes) y la diversidad donde crecen (ecosistemas) Bellard *et al* 2012. Los rasgos que se mejoran con niveles elevados de CO₂ también confieren una mayor competencia a las especies invasoras (Terrer *et al* 2021), se espera que las plantas C3 mejoren su productividad en la medida que aumente la concentración atmosférica de CO₂ y los pastos con metabolismo fotosintético tipo C4 con adecuados niveles de nitrógeno serían capaces de incrementar fuertemente su producción de biomasa (Hager *et al* 2016). Sin embargo el incremento de la temperatura ambiente puede cambiar la respuesta estomática al incremento de la concentración atmosférica de CO₂ al disminuir el periodo de apertura en un amplio grupo de especies bajo numerosas condiciones, y aunque aún no es concluyente, se considera que podría influir negativamente en la evapotranspiración (ET) del ecosistema especialmente en

plantas tipo C3 (Bernacchi *et al* 2012), por lo que los árboles del trópico podrían crecer más lentamente. Otros elementos a considerar en el diseño y arquitectura de los agro-ecosistemas tropicales, además de los fisiológicos, son los concernientes a mantener la salud del suelo. Considerando que las áreas en monocultivo en ambientes cercanos al paralelo ecuatorial tienden a mantener bajos niveles de carbono Guo y Gifford (2002), y que una alta proporción de las especies arbóreas de los bosques tropicales de América Central están compuestos por leguminosas (Gei *et al* 2018) donde se han asociado precipitaciones bajas (<1000 mm) y muy altas (>3000 mm) como la principal variable de pérdidas de carbono orgánico en suelo en usos agropecuario después de la deforestación, mientras que lluvias entre 2000 a 3000 mm se vinculan a fuertes incrementos (FAO, 2019). Los agroecosistemas de estas regiones tropicales necesitan altas tasas de reposición de carbono y nitrógeno en el agro-ecosistema (Malhi *et al* 1999; Weintraub *et al* 2016), que se pueden obtener con combinaciones de plantas de diversas procedencias.

El objetivo de este estudio fue realizar un ejercicio de diferencias y semejanzas de rasgos ecológicos a considerar en el diseño de agroecosistemas en países de la faja más tropical en diferentes continentes a los que cruzan el paralelo 10 latitud norte, con el fin de observar elementos a considerar en la restauración antropogénica y efectiva del paisaje en pequeña escala en la región seca de Costa Rica; para apoyar en una forma holística la gestión integrada de los recursos naturales, los medios de vida y costumbres de las comunidades de zonas de vida, y reducir la tendencia del bosque seco de Costa Rica a la aridez.

METODOLOGÍA

Se seleccionaron 16 sitios con estaciones meteorológicas de Ghana donde la precipitación máxima fuera cercana a los 2000 mm anuales, siendo que quedaron distribuidas en prácticamente todo el territorio. En Costa Rica, se localizaron 14 estaciones meteorológicas en el Pacífico Seco y otras zonas con un promedio de lluvia acumulada con un límite semejante. Para este

estudio se definieron tres variables meteorológicas: precipitación (**P**) acumulada en mm/año; humedad relativa (**HR**) en % y temperatura (**T**) promedio, diaria por año en °C y otras tres variables eco-climáticas, de acuerdo con el esquema de zonas de vida de Holdridge (1978) (Jiménez 1982; Jiménez 2017). El cálculo de estas últimas se detalla a continuación:

Biotemperatura (BIOT)

La biotemperatura se utilizó para describir la temperatura media anual de crecimiento de los ecosistemas, teniendo en cuenta solo aquellos periodos en los que la temperatura fue favorable para el crecimiento biológico; en este caso se utilizó la fórmula (f1) para excluir las temperaturas extremadamente altas y vincularlas con la latitud.

f1

$$\text{BIOT} = \frac{t - (3 \times \text{grados de latitud}) \times (t - 24)^2}{100}$$

Donde: = temperatura diaria promedio anual
Evapotranspiración potencial (EVTp)

En segundo término la evapotranspiración potencial (EVTp) que se definió como la máxima cantidad de agua que podría ser evaporada y transpirada por la vegetación bajo condiciones climáticas ideales, en cada sitio de estudio, fórmula (f2). Se considera que la fórmula empleada es de carácter lineal, por lo tanto la constante se dividió en 12 tramos para obtener un valor mensual (4.91) cuando fue necesario.

f2

$$\text{EVTp} = \text{BIOT} \times 58,93$$

Relación EVTp/P

Como tercera variable importante se seleccionó en forma anual la relación EVTp/P como corrector de la EVTp e indicador de aridez y del estado natural del balance hídrico del ecosistema.

Donde:

Clima Húmedo: ETP/P < 0.75

Clima Subhúmedo: 0.75 < ETP/P < 1.0

Clima Semiárido: 1.0 < ETP/P < 2.0

Clima Árido: ETP/P > 2.0

Se realizaron diferentes pruebas estadísticas de correlación y multivariable. Se utilizó el método Manhattan o distancia euclídea (Di Rierzo et al 2008) para la formación de grupos de sitios en la clasificación de aridez.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De las variables anualizadas por país se desprende en forma general que las zonas estudiadas de Costa Rica fueron menos secas porque presentan una mayor precipitación acumulada y una temperatura media menor que las de Ghana (Cuadro 2).

Cuadro 2. Comparación entre Costa Rica y Ghana de seis variables climáticas anuales Banco Mundial. (2024).

Country		Costa Rica		Ghana	
		Moda	Promedio	Moda	Promedio
Precipitation	mm	1040.0	1700.4 (266) **	534.0	917.4 (338.2) **
R. Humidity	%	60.2	76.0 (8.1)	41.8	66.7 (13.6)
Temperature	°C	16.6	25.0 (3.6) **	27.6	29.1 (1.7) **
EVTp	mm	997.0	1336.8 (139.7)	372.8	1205.5 (337)
BIOT	°C	16.6	22.7(2.4)	6.3	20.5(5.7)
EVTp/P		0.56	1.5 (2.6)	0.59	1.4(0.4)

** en la misma fila difieren significativamente (P>0.001)

() Desviación típica

La figura 1 muestra la variación anual para las variables eco-climáticas, en el caso de la BIOT y la EVTp, se observa que la mayoría de la variación de los sitios secos de Costa Rica estaba contenida en Ghana, mientras que para la relación EVtp/P Ghana presentó muy poca variación y dentro del rango de variación amplio de Costa Rica. Por lo tanto, para el crecimiento de la vegetación, Costa Rica mantiene una mayor Biot y EVT en los sitios estudiados denominados secos, que podría indicar que es adecuada aún para el crecimiento

de árboles, pero con una tendencia de crecimiento estacional después de una relación EVTp/P mayor a 1.0, indicando posibles tasas de crecimiento más lentas para este tipo de vegetación en estos entornos ecológicos, propiciando las condiciones para una mayor presencia de plantas herbáceas con tolerancia a altas temperaturas y menores requerimientos de humedad. Mientras en Ghana la tendencia es a un paisaje con mayor presencia de plantas herbáceas con muy pocos de árboles.

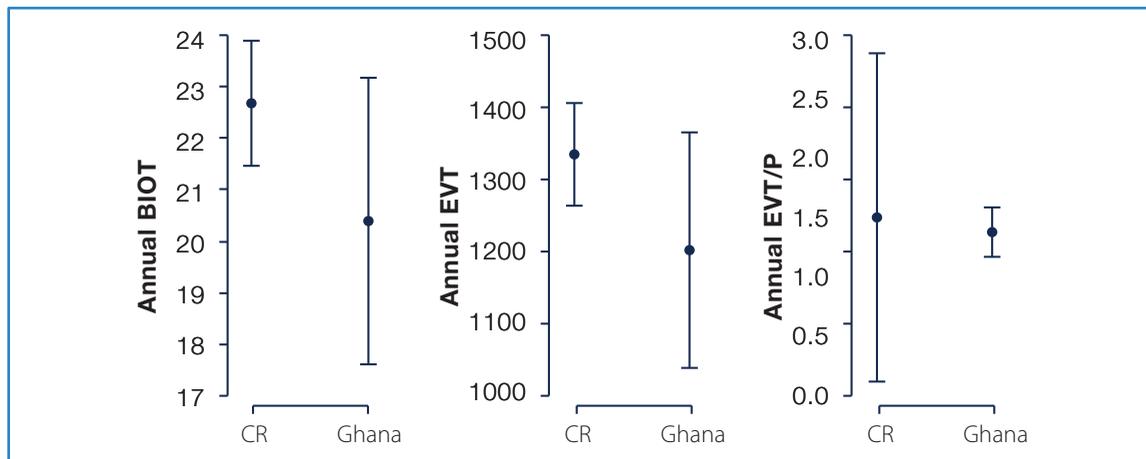


Figura 1. Variación anual de la BIOT, EVTp y relación EVTp/P, en Costa Rica y Ghana, 2024.

En concordancia con el esquema de zonas de vida de Holdridge (1966), se observó una reducción importante de la temperatura ($P < 0,001$) de -0.8 °C por cada 100 metros de incremento en altitud, y una tendencia ($P < 0,027$) incremental de 1.3 °C por cada grado de la latitud. En ambos casos con una magnitud diferente entre Ghana y Costa Rica. Por lo que se considera que la corrección por altitud y latitud fue importante para estimar la BIOT.

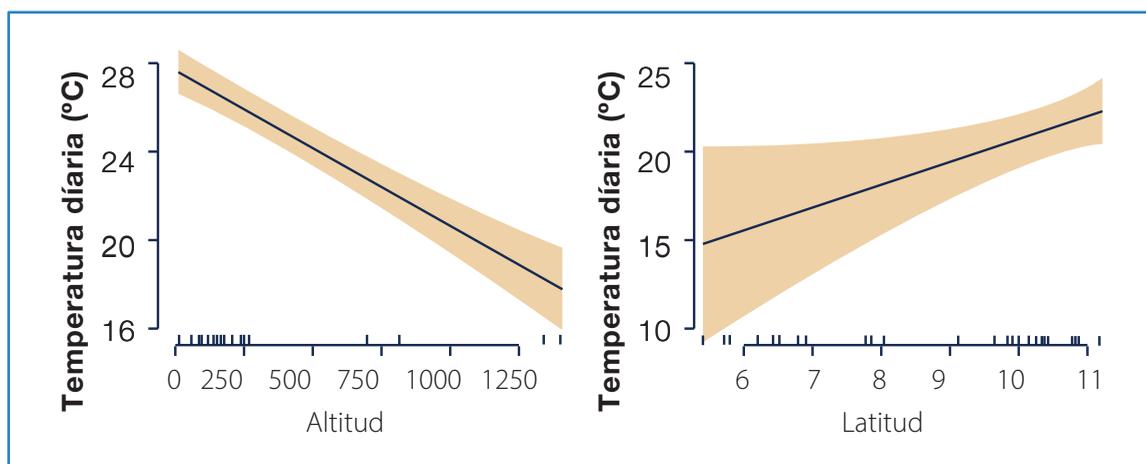


Figura 2. Variación de la temperatura diaria anual con respecto a la altitud y latitud, 2024.

De acuerdo con la figura 3, Ghana presentó solamente dos grados de aridez; con siete sitios semiáridos y nueve áridos, con valores promedio de 1.4 y 2.6 EVTp/P respectivamente. Los datos de los sitios seleccionados como secos en el caso de Costa Rica se agruparon en tres grados de aridez: semiárido cuatro lugares (1.2 EVTp/P), subhúmedo y húmedo cinco sitios por cada nivel (0.88 y 0.68 EVTp/P respectivamente). En el caso de Ghana los conglomerados tendieron a ser más secos y parecerse más entre ellos, mientras en el caso de Costa Rica la tendencia es a una mayor humedad y diferencia entre grupos. Este hecho es importante desde el punto de vista ecológico, pues

los ecosistemas de los países no son homólogos a pesar de ubicarse en el mismo paralelo y con precipitaciones anuales semejantes. Por lo tanto la restauración debe hacerse considerando los elementos ecológicos de cada sitio y con función antropogénica (demografía, cultura, costumbres, economía) con la finalidad de mejorar los medios de vida de los pobladores de esos sitios. La información obtenida indica que los elementos restauradores deben diferenciarse de acuerdo a cada nivel de aridez en cada país, como tipo de especie vegetales a fomentar, el uso y función agro-ecosistémica en el agroecosistema.

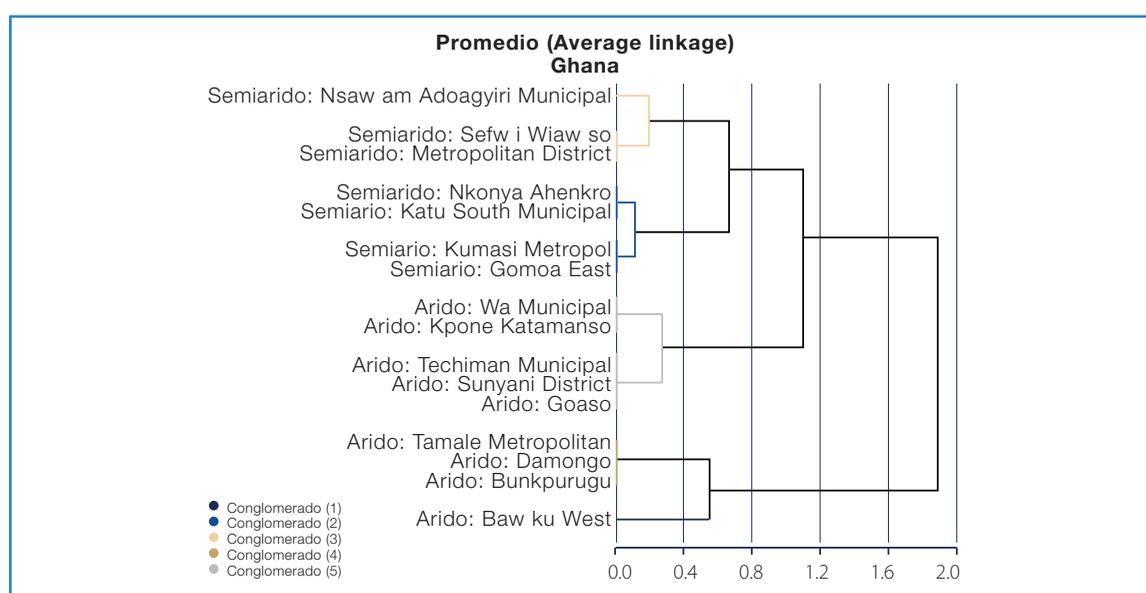


Figura 3. Separación por conglomerados de los sitios en estudio, utilizando las variables: relación humedad, altitud y ETVp/P por país e indicador de aridez, 2024.

El cuadro 3 muestra los resultados del análisis multivariado de cuatro variables consideradas para la definición de cada época del año. Se observa que las épocas seca y lluviosa son diferentes entre países reforzando lo indicado anteriormente que los climas no son homólogos.

Cuadro 3. Época de baja y alta precipitación, análisis multivariable comparativo.

País	Periodo	T		HR		P	BIOT	*
		Meses	°C	%	mm	°C eq		
Costa Rica	Lluvioso	8-9	24.7	82.4	207.4	22.9	a	
	Seco	3-4	25.5	66.4	20.1	22.5	b	
Ghana	Lluvioso	8-6	27.8	80.0	124.2	23.2	c	
	Seco	4-6	30.9	49.3	22.6	17.2	d	

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Por lo tanto, desde un punto de vista ecológico, las diferencias en el periodo seco podrían ser de importancia en el tipo de vegetación predominante. Donde la BIOT y HR, para el caso de Ghana indicaron que el crecimiento vegetativo tiende a muy bajo durante varios meses al año. En la figura 4 se observa en forma mensual para todos los sitios estudiados la relación altamente significativa ($p < 0,0001$) temperatura: biotemperatura, con un intercepto matemático de las curvas de ambos países en 26.5 °C lo que se puede interpretar como el punto de mayor crecimiento vegetal en condiciones adecuadas de humedad del suelo. La BIOT en Costa Rica fue más favorable para el crecimiento continuo de la vegetación durante

todo el año. Lo anterior es de suma importancia en temas de restauración del paisaje con participación y producción antropogénica. En el caso de Costa Rica es posible que sus ecosistemas tiendan a ser más sensibles a factores biológicos (MINAE 2012), como el caso de la introducción transfronteriza, involuntaria o no de nuevas especies, desde arvenses altamente invasivas hasta plantas de cultivo en las que se inviertan recursos de todo tipo para su establecimiento. Mientras en el caso de Ghana sus ecosistemas tienden a ser sensibles en los factores abióticos como la reducción de agua en el suelo y el incremento de temperatura, con menos posibilidad de establecimiento de una gran cantidad de especies introducidas.

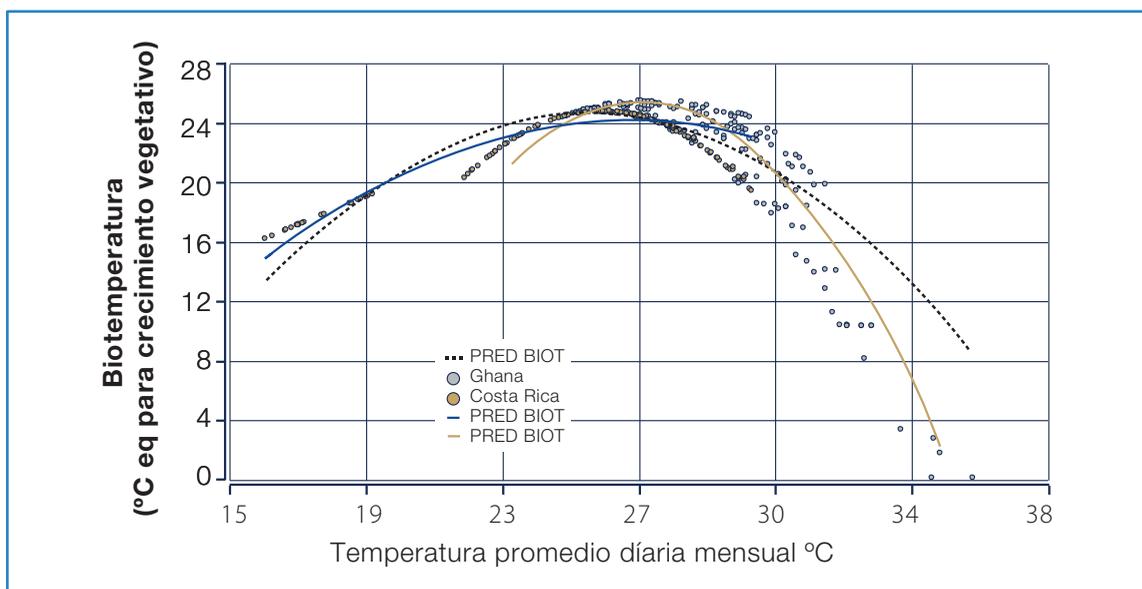


Figura 4. Relación Temperatura: Biotemperatura, por mes por sitio de estudio, 2024.

En conclusión, la restauración antropogénica asistida debe atender a las necesidades ecológicas y de las personas que tienen sus medios de vida en las zonas a restaurar y debe ser cuidadosamente diseñada. En el contexto actual de cambio climático la inmediatas por proceso de secuestro de carbono a través de la introducción de especies introducidas en plantaciones forestales en monocultivo no es la mejor solución, ni ecológica

ni socioeconómica. Se plantea como una solución sustentable la construcción de paisajes de agro-ecosistema biodiversos, que además de cumplir con roles ecosistémicos concretos múltiples y simultáneos, reducirían la pobreza y migración de las personas de las zonas intervenidas por proyectos de restauración de paisajes, generando bienestar y progreso, en un entorno agroecológico más sostenible.

LITERATURA CITADA

- Abarca-Monge, S. (2016). La visión costarricense de cómo la agricultura enfrenta al cambio climático. *Revista Ambientico*, 258, 50. <https://www.una.ac.cr/revistaambientico/la-vision-costarricense-de-como-la-agricultura-enfrenta-al-cambio-climatico>
- Allan, J. R., Possingham, H. P., Atkinson, S. C., Waldron, A., Di Marco, M., Butchart, S. H. M., Adams, V. M., Kissling, W. D., Worsdell, T., Sandbrook, C., Gibbon, G., Kumar, K., Mehta, P., Maron, M., Williams, B. A., Jones, K. R., Wintle, B. A., Reside, A. E., & Watson, J. E. M. (2022). The minimum land area requiring conservation attention to safeguard biodiversity. *Science*, 376(6597), 1094–1101. <https://doi.org/10.1126/science.abl9127>
- Banco Mundial. (2024). Data. <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD>
- Bravo, M. C., Somarriba, E., & Arteaga, G. (2011). Factores que afectan la abundancia de insectos polinizadores del cacao en sistemas agroforestales. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 28(1), 119-131. <https://doi.org/ISSN-e 2256-2273, ISSN 0120-0135>
- Bellard et al (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15(4), 365–377. [PDF] Impacts of climate change on the future of biodiversity. | Semantic Scholar
- Bernacchi, C. J., Kimball, B. A., Quarles, D. R., Long, S. P., & Ort, D. R. (2007). Decreases in stomatal conductance of soybean under open-air elevation of [CO₂] are closely coupled with decreases in ecosystem evapotranspiration. *Plant Physiology*, 143(1), 134-144. <https://academic.oup.com/plphys/article/143/1/134/6106572>
- Crutzen, P. J. (2002). Geology of mankind. *Nature*, 415(6867), 23. DOI: 10.1038/415023^a
- Geology of Mankind | SpringerLink
- de Camino R y G. Budowski. 1995. Impactos ambientales de las plantaciones forestales. *Revista Forestal Centroamericana* 101. Turrialba. (mimeogr).
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2008). InfoStat, versión 2020. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2019). Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems: Guidelines for assessment (Version 1). Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership. FAO. [content \(fao.org\)](https://www.fao.org/content/fao.org)
- Guo, L.B.; Gifford, R.M. 2002. Soil Carbon Stocks and Land Use Change: a Meta Analysis. *Global Change Biology* 8:345-360. *Global Change Biology | Environmental Change Journal | Wiley Online Library*
- Hager, H. A., Ryan, G. D., Kovacs, H. M., & et al. (2016). Effects of elevated CO₂ on photosynthetic traits of native and invasive C₃ and C₄ grasses. *BMC Ecology*, 16(28). <https://doi.org/10.1186/s12898-016-0082-z>
- Holdridge L. 1978. Ecología basada en zonas de vida. San José, Costa Rica, IICA. 216p.
- Jiménez S. H. (1982). Anatomía del sistema de clasificación de Holdridge. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 29p. (mimeogr). Recuperado de [Anatomia_del_sistema_de_clasificacion_Holdridge.pdf \(catie.ac.cr\)](https://www.catie.ac.cr/anatomia-del-sistema-de-clasificacion-holdridge.pdf)
- Jiménez S. H. (2017). Dr. Leslie R. Holdridge: La capacidad de crear a partir de lo cotidiano. *Revista Ambientico*. 263:7 Recuperado de Dr. Leslie R. Holdridge: la capacidad de crear a partir de lo cotidiano – [Revista Ambientico \(una.ac.cr\)](https://www.una.ac.cr)
- Jagoret, P., Saj, S., & Carimentrand, A. (2020). Cacaocultura agroforestal en África: el arte de combinar producción sostenible y servicios ecológicos. *Perspective*, 54, 1-4. <https://doi.org/10.19182/perspective/31918>
- López, R. H., Espejel, G. V., & Moreno-Casasola, P. (2014). Zacate alemán (*Echinochloa pyramidalis*): planta invasora de humedales costeros del sureste mexicano. *Investigación Ambiental, Ciencia y Política Pública*. (PDF) Zacate alemán (*Echinochloa pyramidalis*): planta invasora de humedales costeros del sureste mexicano ([researchgate.net](https://www.researchgate.net))
- Gei, M., Rozendaal, D.M.A., Poorter, L. et al. (2018) Legume abundance along successional and rainfall gradients in Neotropical forests. *Nat Ecol Evol* 2, 1104–1111. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0559-6>

Malhi, Y., Baldocchi, D., Jarvis, P. (1999). The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell and Environment* 22:715–740. pce453 (berkeley.edu)

Morantes-Toloza, J., & Renjifo, L. M. (2018). Cercas vivas en sistemas de producción tropicales: una revisión mundial de los usos y percepciones. *Revista de Biología Tropical*, 66(2), 739-753. <https://doi.org/10.15517/rbt.v66i2.33405>

MINAE (Ministerio de Ambiente y Energía) (2021). Proyecciones de cambio climático regionalizadas para Costa Rica: (escenarios RC0050-2.6 y RCP-8.5). Instituto Meteorológico Nacional. *ProyeccionesEscenariosClimaticos.indd* (imn.ac.cr)

Montagnini, F.; Somarriba, E., Murgueitio, E., Fassola, H., Eibl, B. (2015). *Sistemas agroforestales: Funciones productivas y ambientales*. CIPAV/CATIE (CATIE 402) 454 p. *Sistemas agroforestales: funciones productivas, socioeconómicas y ambientales* (catie.ac.cr)

Newton, A. C., & Tejedor, N. (2011). *Principios y práctica de la restauración del paisaje forestal. Estudios de caso en las zonas secas de América Latina*. Gland, Suiza: UICN. 409p. untitled (iucn.org)

Terrer, C., Phillips, R.P., Hungate, B.A. et al. A trade-off between plant and soil carbon storage under elevated CO₂. *Nature* 591, 599–603 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03306-8>

Veldkamp, E. (1994). Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. In *Soil organic carbon dynamics in pastures established after deforestation in the humid tropic of Costa Rica* (Ph. D Thesis). Wageningen University. p. 117. *VeldkampSSSAJ1994.pdf*

Weintraub, S., Cole, R., Schmitt, C., & All, J. (2016). Climatic controls on the isotopic composition and availability of soil nitrogen across mountainous tropical forests. *Ecosphere*, 7(8), 1-13. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1412>