Entropía del Cambio Climático: Análisis Dinámico en los Andes de Cusco y el Trópico de Puerto Rico

Roseliz Marie Montilla Polanco[1], Prof. David Quispitupa Yupa, M.S.[2]
[1]Departamento de Ingeniería Civil, Ambiental y Agrimensura, Universidad Politécnica de Puerto Rico
[2]Departamento de Matemáticas y Ciencias, Universidad Politécnica de Puerto Rico
Programa de Investigación Subgraduada para Estudiantes de Honor y Destacados (URP-HOS) 2025-2026

Resumen

El cambio climático puede manifestarse de manera diferente según las características de cada sistema climático, haciendo necesario contar con métricas que permitan comparar su variabilidad. Esta investigación utiliza la entropía de Shannon para estudiar los patrones de temperatura y precipitación en dos contextos contrastantes: San Juan, Puerto Rico, y Cusco, Perú, durante 2020–2025. Se analizaron registros meteorológicos de las estaciones del Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín (TJSJ) y el Aeropuerto Internacional Alejandro Velasco Astete (SPZO), clasificando las observaciones en categorías fijas y calculando la entropía mensual en bits. El estudio busca identificar diferencias, patrones estacionales y tendencias descriptivas entre ambas localidades. Los resultados muestran comportamientos contrastantes y tendencias lineales débiles, destacando el potencial de la entropía de Shannon como métrica complementaria para caracterizar la variabilidad meteorológica y apoyar futuros análisis climáticos.

Introducción

El cambio climático puede modificar los patrones de temperatura y precipitación de manera diferente según cada sistema climático, por lo que es importante contar con métricas que permitan describir y comparar su variabilidad. La entropía de Shannon mide la incertidumbre y diversidad de una distribución y, aplicada a datos meteorológicos, permite representar en bits cómo se distribuyen las observaciones de temperatura y precipitación. Este estudio compara San Juan, Puerto Rico, como sistema tropical insular, y Cusco, Perú, como sistema andino, utilizando la entropía de Shannon para identificar diferencias en la variabilidad mensual, patrones estacionales y tendencias descriptivas durante 2020–2025.

Objetivos

Objetivo general:
Cuantificar y comparar la entropía mensual de temperatura y precipitación en San Juan y Cusco durante 2020–2025, identificando su variación, estacionalidad y tendencias.

Objetivos específicos:
- Depurar y organizar los datos meteorológicos de TJSJ y SPZO.
- Calcular la entropía mensual de temperatura y precipitación en bits.
- Comparar la variabilidad, estacionalidad y tendencias entre San Juan y Cusco.
- Identificar limitaciones de los datos que puedan afectar la interpretación de los resultados.

Metodología	
Elemento	**Descripción**
Diseño	Cuantitativo, longitudinal, comparativo y no experimental
Periodo	Enero 2020-diciembre 2025
Localidades	San Juan, Puerto Rico (TJSJ) y Cusco, Perú (SPZO)
Variables	Temperatura del aire y precipitación
Datos	Registros meteorológicos subdiarios
Clasificación	Temperatura: intervalos de 4°F Precipitación: 10 categorías
Cálculo	Entropía mensual mediante la fórmula de Shannon
Unidad	Bits
Análisis	Variación temporal, estacionalidad, pendiente lineal y R^2
Valores Obtenidos	72 valores mensuales por variable y localidad

Datos		
Elemento	San Juan (TJSJ)	Cusco (SPZO)
Ubicación	San Juan, Puerto Rico	Cusco, Perú
Periodo	2020-2025	2020-2025
Variable	Temperatura y precipitación	Temperatura y precipitación
Datos	Observaciones subdiarias	Observaciones subdiarias
Precipitación	Registros meteorológicos	Campo PP de METAR

Resumen de resultados				
Variable	San Juan: H media	Cusco: H media	Pendiente SJ	Pendiente Cusco
Temperatura	2.925 bits	3.009 bits	-0.0045 bits/año	+0.0292 bits/año
Precipitación	0.710 bits	0.204 bits	+0.0085 bits/año	-0.0068 bits/año

T_max	T_min	T_cambio	T_class	Frecuencia	F_acumu	Probabilidad	Entropia (nats)	Entropia (bits)
87	71	16	70	0	0	0	0	0
			71.7	1	1	0.001338688	0.008856848	0.01277773
		B2	73.4	16	17	0.021419009	0.082323458	0.118767645
		B748	75.1	70	87	0.093708166	0.221860637	0.320077241
		Enero	76.8	69	156	0.092369478	0.22002028	0.317422166
			78.5	174	330	0.232931727	0.339383829	0.489627367
			80.2	175	505	0.234270415	0.339991783	0.490504459
			81.9	60	565	0.080321285	0.202547841	0.292214766
			83.6	104	669	0.139223561	0.274503515	0.39602486
			85.3	67	736	0.089692102	0.216281074	0.312027632
			87	11	747	0.014725569	0.062114952	0.089612933
				0	747	0	0	0
			RANGOS	ene-23		ENTROPIA=	1.967884217	2.8390568

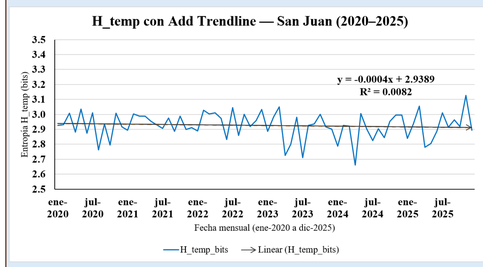
Datos meteorológicos → Categorías → Frecuencias → Probabilidades (p_i) → Shannon

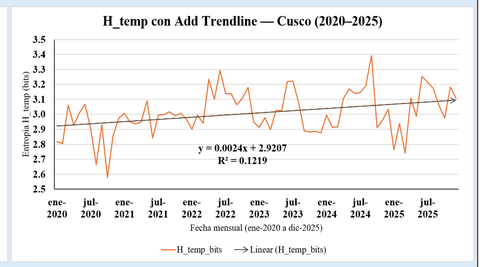
$$H = -\sum p_i log_2(p_i)$$

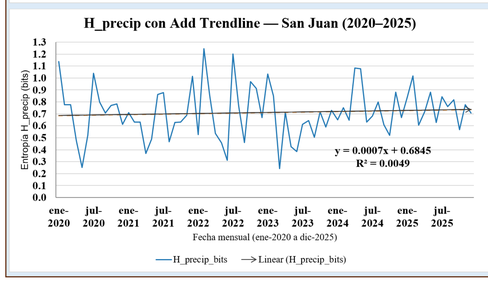
p_i = frecuencia de la categoría / total de observaciones
Resultado: H mensual en bits

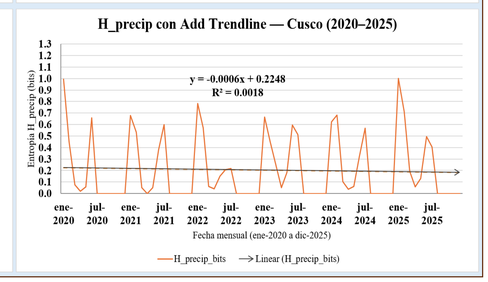
Para cada mes, las observaciones se clasificaron en categorías fijas y se calculó la proporción de datos en cada categoría. Estas probabilidades se utilizaron en la ecuación de Shannon para obtener un valor mensual de entropía.

Análisis y Resultados









Conclusión y Recomendaciones

La entropía de Shannon permitió identificar diferencias en la variabilidad meteorológica entre San Juan y Cusco. San Juan presentó mayor entropía media de precipitación, mientras que Cusco mostró una entropía de temperatura ligeramente superior. Sin embargo, los bajos valores de R^2 indican que las series no presentan tendencias lineales fuertes. Por tanto, los resultados representan patrones exploratorios de variabilidad y estacionalidad meteorológica, no evidencia concluyente de cambio climático. Completar la armonización temporal y el control de calidad de los datos; evaluar la sensibilidad de las categorías utilizadas; aplicar métodos adicionales de tendencia; ampliar el periodo de estudio; y, posteriormente, relacionar la entropía con registros independientes de eventos climáticos extremos.

Trabajo Futuro

- Ampliar la serie temporal.
- Armonizar los registros de TJSJ y SPZO.
- Mejorar el control de calidad de los datos.
- Evaluar diferentes categorías de entropía.
- Incorporar Mann–Kendall y pendiente de Sen.
- Relacionar la entropía con eventos climáticos extremos.

Agradecimientos y Referencias

Programa de Investigación Subgraduada para Estudiantes de Honor y Destacados de la Universidad Politécnica de Puerto Rico; Title V STEM; Universidad Politécnica de Puerto Rico; y las instituciones que proveen los registros meteorológicos y la documentación METAR. También, al Prof. David Quispitupa Yupa, mentor de esta investigación, por su orientación, apoyo y seguimiento durante el desarrollo del proyecto.

Algunas de las referencias:

Amato, F., Guignard, F., Humphrey, V., & Kanevski, M. (2021). Spatio-temporal evolution of global surface temperature distribution. *Proceedings of the 10th International Conference on Climate Informatics (CI2020)*, 37–43. https://doi.org/10.1145/3429309.3429315
Gibbins, G., & Haigh, J. D. (2020). Entropy production rates of the climate. *Journal of the Atmospheric Sciences, 77*(10), 3551–3566. https://doi.org/10.1175/JAS-D-19-0294.1 Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report*. IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf
Kleidon, A. (2010). Life, hierarchy, and the thermodynamic machinery of planet Earth. *Physics of Life Reviews, 7*(4), 424–460. https://doi.org/10.1016/j.plrev.2010.10.002