

## **Niveles de aridez en función a los factores climáticos en el valle del Cusco**

### **Aridity levels according to climatic factors in the valley of Cusco**

**Borda Tamayo, Heidi Luis; Delgado Márquez, Américo; Jihuallanca Hanco, Maribel**

Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

Recibido el 10 de mayo del 2016 - Aceptado el 24 de junio del 2016

---

#### **Resumen**

El presente trabajo se realizó en el valle del Cusco, el mismo que se encuentra en la Región Cusco, Provincia de Cusco, abarcando a su vez los distritos de Cusco, Wanchaq, Santiago, San Sebastián, San Jerónimo y Saylla. Se determinó el nivel de aridez en los últimos 32 años (1983-2015), usándose los datos climáticos proporcionados por la estación meteorológica Luis Olazo Olivera de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco. Los datos utilizados sirvieron para hallar el índice de aridez (IA) propuesto por la UNEP y determinar en qué zona se encuentra el valle del Cusco. Luego del procesamiento de datos se observó que las lluvias tienden a disminuir, pero sucede lo contrario cuando la temperatura empieza a incrementarse (al igual que la evapotranspiración). Se determinó un IA de 0.45, ubicando al valle del Cusco en una zona semiárida, donde el IA va disminuyendo año a año, mostrando una tendencia poco significativa, lo que indicaría una probabilidad baja de que el valle del Cusco desarrollase una zona árida. Para el análisis se utilizó el software TREND que sirve para evaluar la significancia en la tendencia de los datos climáticos utilizando los tests de Mann-Kendall, Cusum, Rank-sum y T-Student. Al obtener los resultados se observó que la precipitación y la humedad relativa tienden a disminuir, aunque no de forma significativa. La temperatura tiende a incrementarse siendo significativa al igual que la evapotranspiración que se eleva año a año.

**Palabras clave:** Índice de aridez, cambio climático, factores climáticos, etc.

#### **Abstract**

This work was carried out in the valley of Cusco which is in the Cusco region, province of Cusco and covers the districts of Cusco, Wanchaq, Santiago, San Sebastian, San Jeronimo and Saylla. The level of aridity was determined in the last 32 years (1983-2015), for which the weather data from the weather station Olazo Luis Olivera of San Antonio Abad National University of Cusco was used. These data helped us to find the aridity index proposed by the UNEP and determine in which area the valley of Cusco is. After processing the data, it was observed that the rains have a tendency to decrease, but the opposite happens with the temperature which begins to increase. An aridity index of 0.45 was determined, placing the valley of Cusco in a semiarid area, however this is declining year after year, but without becoming an arid area. Likewise, the TREND statistical package was used to assess whether there was a trend in climate data using the Mann-Kendall, Cusum, Rank-sum and T-Student tests. When obtaining the results, we observed that precipitation and relative humidity tend to decrease but not significantly. Regarding the temperature, it has a tendency to increase which is significant as well as the evapotranspiration which rises every year.

**Keywords:** Aridity index, climate change, climatic factors, etc.

## Introducción

La aridez es la falta de agua en el suelo y de humedad en el aire que se halla en contacto con él. Un suelo húmedo enriquece el aire en humedad, y un aire húmedo alimenta con agua el suelo. En aquellas zonas donde reina un anticiclón o donde un sistema montañoso o cualquier otra causa impiden el acceso de aire húmedo sobre un suelo carente de agua, se establece un clima árido: como este es desfavorable a la vida vegetal, la ausencia de plantas agrava la aridez. Geomorfológicamente, la aridez engendra formas características de relieve, como son los pedimentos y las rampas de erosión, las sebas y otras depresiones cerradas, los pedregales y los desiertos cubiertos de dunas.

Los anticiclones constituyen la causa principal de aridez, porque determinan un tiempo estable y seco, y porque desvían fuera de sus propios límites las corrientes de aire húmedo, como ocurre tanto en las banquisas polares como en los desiertos cálidos. En otros casos, como ocurre en Somalia, la aridez se debe al hecho de que las corrientes de aire húmedo de origen marítimo son paralelas a costas montañosas, no pudiendo penetrar en las tierras para beneficiarlas con su humedad. La aridez puede ser también la consecuencia de una deshidratación del aire marítimo al cruzar una cordillera transversal interpuesta entre el océano y las regiones del interior. A ese fenómeno se deben las regiones áridas de Nuevo México y Texas. En otras partes, como en los Andes, las altiplanicies penetran en el seno de capas atmosféricas exentas de humedad. Ciertos desiertos, como los de la región del Caspio, se deben simplemente a la distancia considerable que media entre esta zona y los océanos generadores de humedad. El aire marítimo tiene entonces múltiples ocasiones de perder su humedad durante el largo recorrido. Los principales desiertos costeros (California, Atacama y Kalahari) se han formado gracias a las corrientes marítimas frías que circulan a lo largo de las costas. En esas aguas, la evaporación no es muy intensa por su baja temperatura. La mayoría de las veces, la aridez resulta de la combinación de varios factores, como los señalados arriba. En general, se agrega el hecho de que cuanto más baja es la latitud, más perpendiculares son los rayos solares y más intensa la evaporación. De ahí que las principales zonas áridas estén en lugares subtropicales: Sahara y Arabia en el norte, y Kalahari y Australia en el sur.

La aridez se manifiesta por un conjunto de aspectos como: un balance hídrico deficitario, permanente en el aire y en el suelo. La xerofilia de la vegetación y la inexistencia de vegetación, o bien formaciones vegetales abiertas con una disminución del número de especies, respecto de lo que ocurre en otros dominios morfoclimáticos. También la desorganización de la red hidrográfica existiendo generalmente un régimen endorreico y cursos de agua intermitentes.

Convencionalmente se considera dominio de la aridez cuando hay menos de 250 mm de precipitación anual, pero esto también depende de otros factores como su repartición estacional, de su relación con las temperaturas, del viento. La variabilidad climática es un factor muy incidente en muchos procesos del medio físico del entorno ambiental, debido a que en los últimos años se evidencian cambios sustanciales. Los ecosistemas se alteran de muchos modos, siendo el más influyente el clima, dependiendo de las particularidades del hábitat, razón de la importancia de conocer y evaluar las relaciones entre los factores climáticos y su incidencia en los procesos de los ecosistemas. El objetivo del presente estudio es determinar el nivel de aridez en los últimos 32 años (1983-2015).

## Método

El presente trabajo se desarrolló en el valle del Cusco, el mismo que se halla en la Región Cusco, Provincia de Cusco y los distritos de Cusco, Wanchaq, Santiago, San Sebastián, San Jerónimo y Saylla. Geográficamente se encuentra entre los 13°00' 45" hasta 13° 34' 50" Latitud Sur y entre los 71°49' 27" hasta 72°03' 32" Longitud Oeste, con una superficie de 363.72.08 km<sup>2</sup>; asimismo, la altitud que comprende el valle es de 3138 m hasta los 3635 m.

Para la obtención del índice de aridez se necesitó de datos meteorológicos como son: Temperatura, Precipitación, Humedad relativa y Evapotranspiración. Los datos corresponden a un periodo de 32 años (1983-2015) de la estación meteorológica Luis Olazo Olivera de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.

Estos datos fueron procesados y analizados en periodos de 10 años; asimismo fueron utilizados para la obtención del índice de aridez.

La ecuación (1) usada para la determinación del índice de aridez está tomada del formulado por la UNEP (Programa de las Naciones Unidas para el Medio

Ambiente, 1997), que viene a ser la precipitación media anual dividida entre la evapotranspiración anual.

$$I = P/ET_o$$

Para determinar la evapotranspiración se usó la ecuación (2) de Linacre:

Donde:

- ET<sub>o</sub>= Evapotranspiración
- T= Temperatura media anual
- h= Elevación (msnm)
- To= Punto de Rocío
- φ= Altitud (radianes)

$$ET_o = \frac{500 \times T_m}{(100 - \phi)} + \frac{15 \times (T - T_o)}{80 - T}$$

$$T_m = T + 0,006 \times h$$

Y para hallar el punto de rocío se usó la ecuación (3):

$$T_o = \sqrt[8]{\frac{H}{100} \cdot (112 + 0,9 \cdot T) + (0,1 \cdot T) - 112}$$

Donde:

- T= Temperatura (°C)
- H= Humedad relativa

Los datos se procesaron en una hoja de cálculo Excel, donde se analizó y se obtuvo sus gráficas respectivas. Se aplicó el software estadístico TREND para evaluar si existía una tendencia significativa en los datos climáticos usando los test de Mann-Kendall, Cusum, Rank-sum y T-Student. Asimismo, se obtuvo los índices de pendiente de la precipitación, temperatura, humedad relativa, evapotranspiración y el índice de aridez.

Después de determinar el índice de aridez se utilizó la clasificación y delimitación de las tierras utilizando los criterios propuestos por la UNEP (1997), para ubicar la zona en la cual se halla el valle del Cusco.

**Tabla 1**  
Clasificación del índice de aridez.

Zonas	P/E <sub>to</sub>
Hiperáridas	<0.05
Áridas	0.05 a < 0.20
Semiáridas	0.20 a < 0.50
Subhúmedas secas	0.50 a < 0.65
Subhúmedas húmedas	0.65 a 1
Húmedas	>1

## Resultados

De acuerdo a los objetivos planteados se evaluó la tendencia que muestra la incidencia de los factores climáticos en el valle del Cusco durante los últimos 32 años, para luego establecer el índice de aridez anual del periodo de 32 años analizados, mostrando a continuación los siguientes resultados:

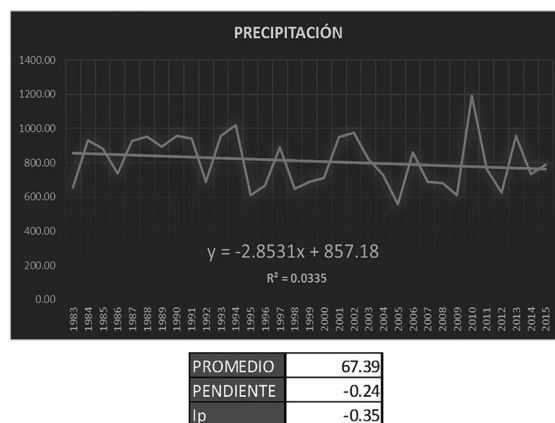


Figura 1: Precipitación en los últimos 32 años

La precipitación anual de los últimos 32 años en el valle del Cusco muestra una tendencia a la disminución de la precipitación, con un índice de pendiente negativo igual a -0.35.

Sin embargo, al realizar el análisis por el periodo de 10 años se ve que en cada periodo la tendencia es hacia el incremento de precipitación, con un índice de pendiente positivo.

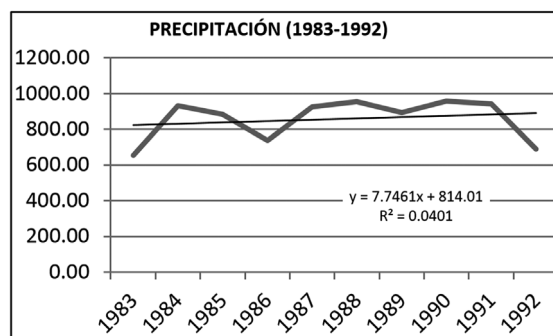


Figura 2: Precipitación de 1983 a 1992

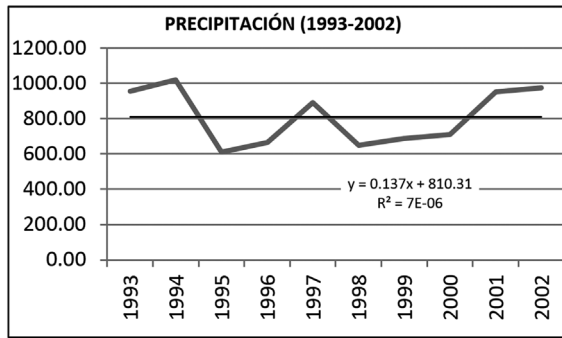


Figura 3: Precipitación de 1993 a 2002

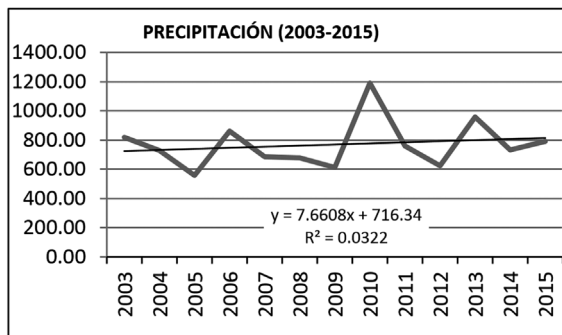


Figura 4: Precipitación de 2003 a 2015

Por otro lado, al realizar el análisis estadístico aplicando el software TREND, el resultado muestra que la tendencia al incremento de la precipitación no resulta significativa.

Tabla 2  
Análisis estadístico de la precipitación.

		a=0.1	a=0.05	a=0.01	
Mann-Kendall	-0.84	1.64	1.96	2.58	NS
Cusum	6	7.01	7.81	9.36	NS
Rank Sum	1.62	1.64	1.96	2.58	NS
Student's t	1.53	1.69	2.04	2.74	NS

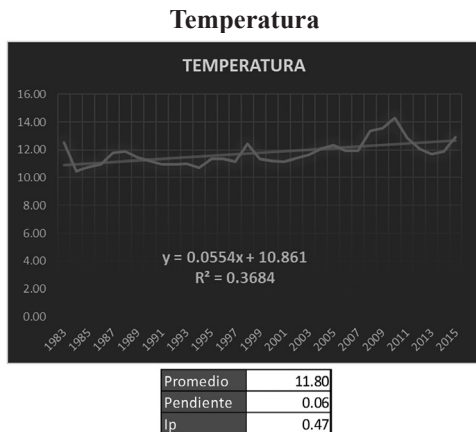


Figura 5: Temperatura en los últimos 32 años

El promedio de temperatura anual de los últimos 32 años en el valle del Cusco muestra una tendencia al incremento, con un índice de pendiente positivo igual a 0.47.

Al realizar el análisis por el periodo de 10 años se ve que en cada periodo la tendencia también es hacia el incremento, con un índice de pendiente positivo para los periodos 1993-2002 y 2003-2015.

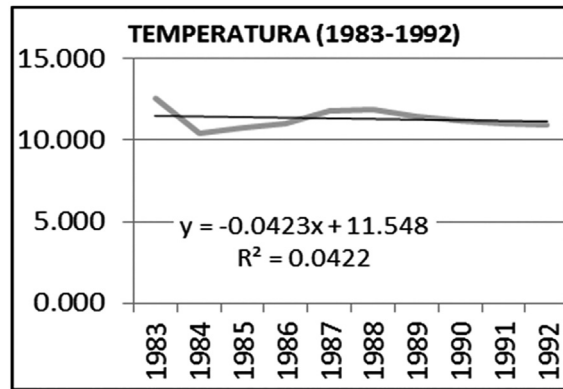


Figura 6: Temperatura de 1983 a 1992

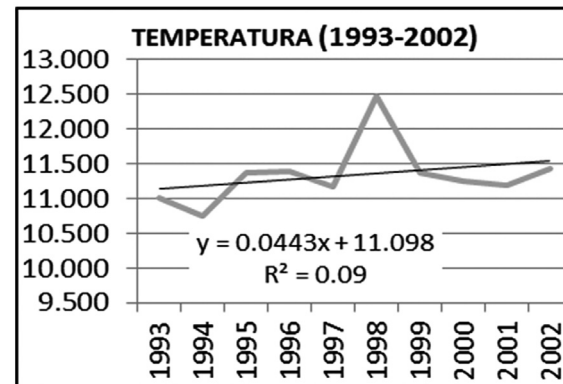


Figura 7: Temperatura de 1993 a 2002

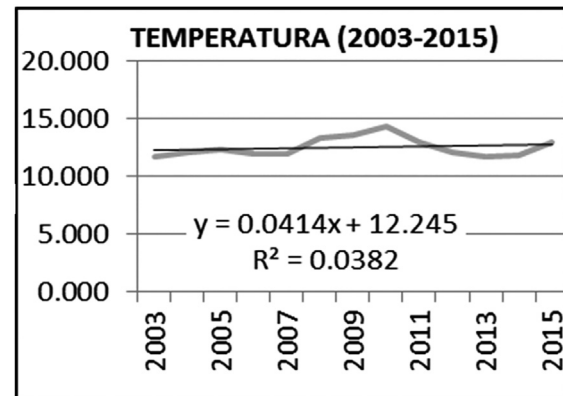


Figura 8: Temperatura de 2003 a 2015

Por otro lado, al realizar el análisis estadístico aplicando el software TREND, el resultado muestra que la tendencia al incremento de la temperatura resulta significativa.

**Tabla 3**  
Análisis estadístico de la temperatura.

		a=0.1	a=0.05	a=0.01	
Mann-Kendall	3.32	1.64	1.96	2.58	S (0.01)
Cusum	23	7.01	7.81	9.36	S (0.01)
Rank Sum	4.18	1.64	1.96	2.58	S (0.01)
Student's t	-3.7	1.69	2.04	2.74	S (0.01)

**Humedad Relativa**

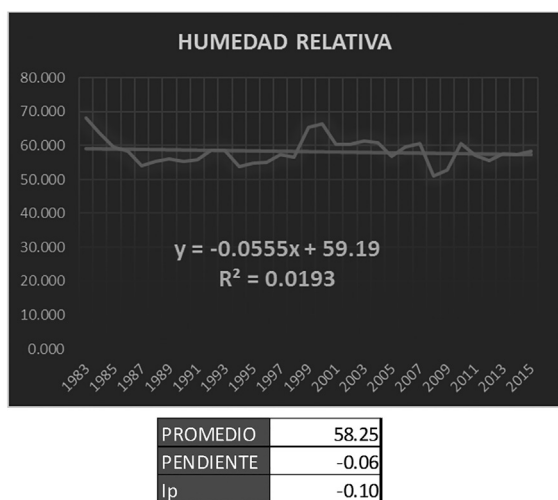


Figura 9: Humedad relativa en los últimos 32 años

El promedio de humedad relativa anual de los últimos 32 años en el valle del Cusco muestra una tendencia a la disminución, con un índice de pendiente negativo igual a -0.10. Al realizar el análisis por el periodo de 10 años se ve que en cada periodo la tendencia también es hacia la disminución, con un índice de pendiente negativo para los periodos 1983-1992 y 2003-2015.

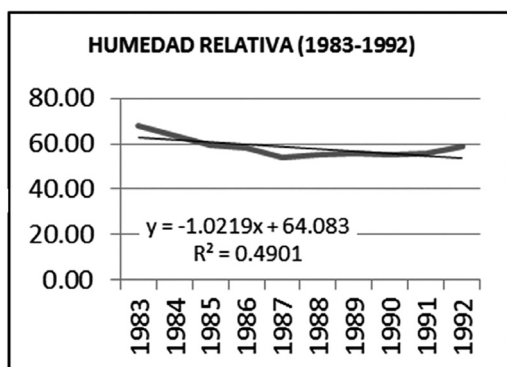


Figura 10: Humedad relativa 1983-1992

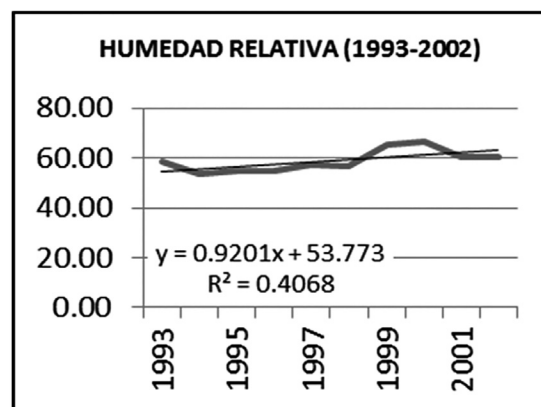


Figura 11: Humedad relativa 1993-2002

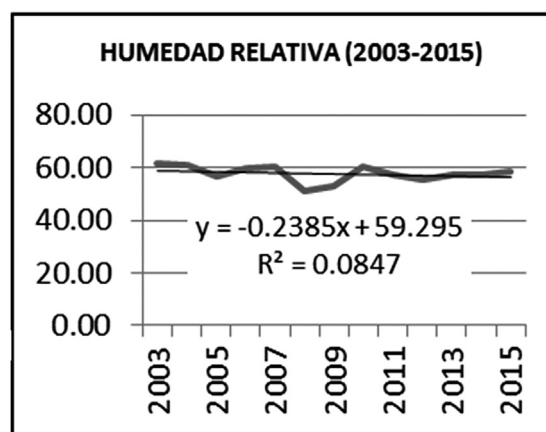


Figura 12: Humedad relativa de 2003 a 2015

Por otro lado, al realizar el análisis estadístico aplicando el software TREND, el resultado muestra que la tendencia al incremento de la humedad relativa no resulta significativa.

**Tabla 4**  
Análisis estadístico de humedad relativa.

		a=0.1	a=0.05	a=0.01	
Mann-Kendall	-0.02	1.64	1.96	2.58	NS
Cusum	4	7.01	7.81	9.36	NS
Rank Sum	-1.61	1.64	1.96	2.58	NS
Student's t	-0.72	1.69	2.04	2.74	NS



Figura 13: Evapotranspiración en los últimos 32 años

El promedio de la Evapotranspiración anual de los últimos 32 años en el valle del Cusco muestra una tendencia al incremento, con un índice de pendiente positivo igual a 0.087. Al realizar el análisis por el periodo de 10 años se ve que en cada periodo la tendencia también es hacia al incremento, con un índice de pendiente positivo para los periodos 1993-2002 y 2003-2015.

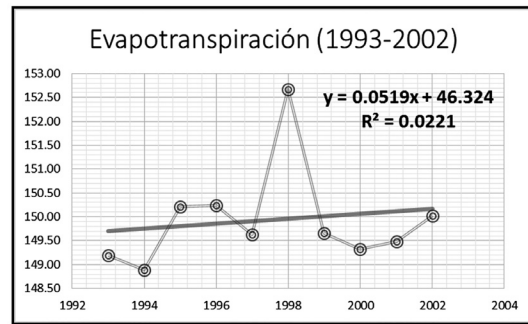
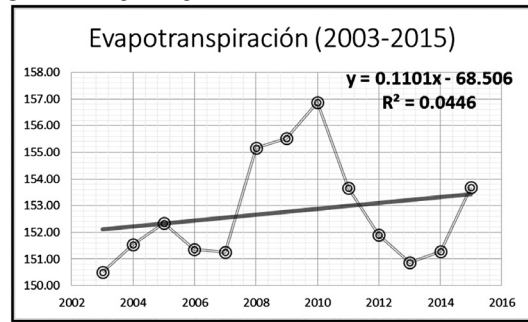


Figura 15: Evapotranspiración de 1993-2002



Por otro lado, al realizar el análisis estadístico aplicando el software TREND, el resultado muestra que la tendencia al incremento de la evapotranspiración es significativa.

Tabla 5  
Análisis estadístico de la evapotranspiración.

	a=0.1	a=0.05	a=0.01	
Mann-Kendall	3.59	1.64	1.96	2.58 S (0.01)
Cusum	17	7.01	7.81	9.36 S (0.01)
Rank Sum	3.82	1.64	1.96	2.58 S (0.01)
Student's t	-4.25	1.69	2.04	2.74 S (0.01)

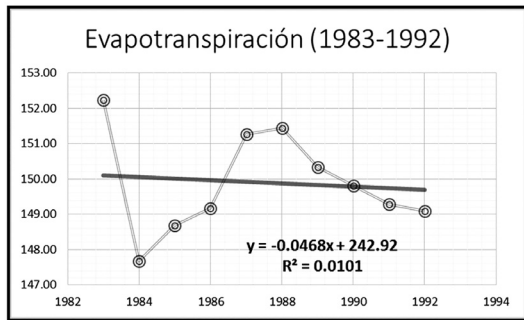


Figura 14: Evapotranspiración de 1983-1992

### Índice de Aridez (periodo 1983 – 2015)

Para establecer el índice de aridez por año dentro del periodo desde 1983 – 2015, primero se hallaron el punto de rocío por año al igual que el nivel de evapotranspiración por año, para luego determinar el índice de aridez, que viene a ser el cociente de la división del punto de rocío entre la evapotranspiración anual.

Tabla 6. Índice de aridez de 1983 a 2015.

Año	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Punto de Rocío (Pr)	6.78	3.79	3.20	3.01	2.75	3.14	2.88	2.49	2.44	3.08	3.13	1.68	2.48	2.59	2.95	3.98	5.06	5.17	3.71	3.96	4.41	4.72	3.91	4.28	4.52	3.34	4.05	6.76	4.56	3.40	3.52	3.62	4.90
Evapotranspiración (Evp)	152.24	147.68	148.68	149.17	151.27	151.44	150.33	149.81	149.29	149.09	149.20	148.88	150.21	150.24	149.63	152.67	149.66	149.33	149.48	150.08	150.51	151.55	152.34	151.35	151.26	155.16	155.54	156.88	153.67	151.90	150.88	151.27	153.69
Índice de Aridez Pr/Evp	0.36	0.53	0.49	0.41	0.51	0.52	0.49	0.53	0.53	0.39	0.53	0.57	0.34	0.37	0.50	0.35	0.38	0.40	0.53	0.54	0.45	0.40	0.31	0.47	0.38	0.37	0.33	0.63	0.41	0.34	0.53	0.40	0.43

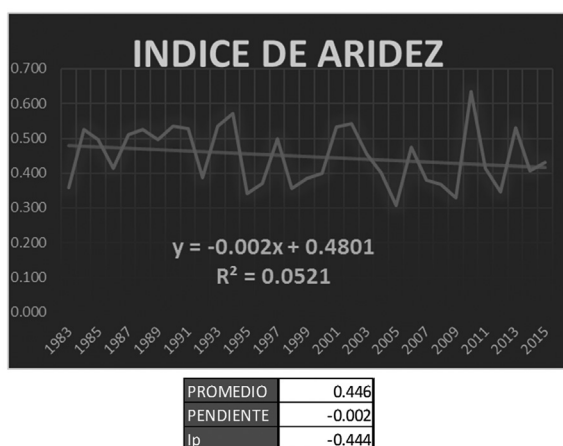


Figura 17: Índice de aridez en los últimos 32 años (1983-2015)

Se determinó que el índice de aridez anual entre los años 1983 y 2015 tiene una tendencia a la reducción de este índice siendo poco significativa esta tendencia según el análisis estadístico empleado.

Tabla 7

Índice de aridez anual entre los años 1983 y 2015.

		a=0.1	a=0.05	a=0.01	
Mann-Kendall	-1.02	1.64	1.96	2.58	NS
Cusum	6	7.01	7.81	9.36	NS
Rank Sum	1.47	1.64	1.96	2.58	NS
Student's t	1.77	1.69	2.04	2.74	S (0.1)

### Discusión

La tendencia al incremento o disminución de los factores climáticos analizados son concordantes con la variabilidad climática que evidencia la problemática mundial del cambio climático.

Los factores climáticos analizados son directamente relacionados con el índice de aridez hallado para los últimos 32 años, evidenciándose el incremento de la temperatura, la disminución de la precipitación fluvial, y el aumento de la evapotranspiración, tendencias relacionadas a que el valle del Cusco tenga una mayor aridez.

El índice de aridez anual hallado para el periodo 1983-2015 ubica al valle del Cusco en una zona semiárida, con una tendencia poco significativa a entrar a una zona árida, en relación a las tendencias de los factores climáticos que determinan este índice, siendo el principal el incremento de la temperatura, haciéndose concordante al calentamiento global.

### Conclusiones

El valle del Cusco presenta una precipitación promedio de 808.67 mm, una temperatura promedio de 11.8 y una humedad relativa de 58.25%.

Se obtuvo un índice de aridez de 0.45, lo que ubica al valle del Cusco en una zona semiárida con una tendencia no significativa a disminuir, pero si este índice seguiría disminuyendo conllevaría a un mayor grado de aridez en el valle del Cusco.

En el caso de la precipitación y la humedad relativa se observa que tiene una tendencia a disminuir, aunque no es significativa. Al observar la precipitación en períodos de 10 años muestra una tendencia a incrementar que parece contradecir a la tendencia a disminuir de los 32 años, pero esto se da porque en los primeros 10 años, la cantidad de precipitación se mantenía entre 800 a 960 mm aprox., y posterior a esto las lluvias anuales disminuyen entre 620 a 800 mm aprox.

Caso contrario sucede con la temperatura y la evapotranspiración que tienden a incrementarse siendo esta significativa para los dos, donde se observa que tiende a incrementar a partir de los últimos 22 años, lo que contribuye a que el valle del Cusco sea cada vez más seco.

### Referencias

- Cruz L., Yanque P., Gil N., Jordán D., Montesinos D., Paucar L., Esquivel B. (2006). Cambio Climático en el Valle del Cusco. CANTUA *Revista de Ciencias Biológicas*. Alpha Servicios Gráficos, Cusco.
- Goyal M., Gonzales E. (2005). *Manejo de Riego por Goteo*. Capítulo 3 Evapotranspiración Universidad de Puerto Rico.
- Guijarro J. (1979). *Cálculo de Evapotranspiraciones potenciales mensuales en Baleares por el método de Linacre*. Centro meteorológico de Baleares, Palma de Mallorca.
- Lavado W., Lhomme J., Labat D., Guyot J., Boulet G. (2015). Estimación de la evapotranspiración de referencia (FAO-56 Penman-Monteith) con limitados datos climáticos en la cuenca andina amazónica peruana. *Revista Peruana Geo-Atmosférica RPGA*.
- UNESCO, 2010. *Atlas de zonas áridas de América Latina y el Caribe*. CAZALAC. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N.º 25.