



REVISTA INDUSTRIAL 4.0

EDICIÓN DIGITAL Nro. 5
NOVIEMBRE 2022

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ingeniería
Carrera de Ingeniería Industrial

M.Sc. Oscar Arnaldo Heredia Vargas
Dra. María Eugenia García Moreno
Ing. Alejandro Mayori Machicao
Ing. Freddy Gutierrez Barea
Ing. Franz Zenteno Benitez

Rector
Vicerrector
Decano Facultad de Ingeniería
ViceDecano Facultad de Ingeniería
Director de Carrera Ingeniería Industrial

Revista Industrial 4.0
Edición Impresa N°. 5 - Noviembre 2022
Impresa ISSN 2958-017X
En Linea ISSN-L 2958-0188

Comite Editor:
Ing. Fernando Sanabria Camacho
Ing. Grover Sanchez Eid
Ing. Mario Zenteno Benitez

Diseño Versión Impresa & web:
Ing. Enrique Orosco Crespo

Imagen Tapa:
shutterstock/ /588546479

Imprenta:
Walking Graf

Deposito Legal:
4-3-68-20

Web:
<https://industrial.umsa.bo/revistaindustrial-40>
Email:
revistaindustrial4.0@umsa.bo

Av. Mcal. Santa Cruz N° 1175, Plaza del Obelisco
Mezzanine, Edificio Facultad de Ingeniería
TEL. 2205000-2205067, Int. 1402



PRESENTACIÓN



Ing. MBA. Franz José Zenteno Benítez
DIRECTOR INGENIERÍA INDUSTRIAL

La visión integral que tiene la ingeniería industrial permite que investigadores de diferentes áreas del conocimiento puedan contar con la Revista Industrial 4.0 como una alternativa para publicar sus trabajos de investigación.

El aprovechamiento adecuado de los recursos naturales, como es el caso actual del litio, para evitar los errores históricos que tuvo el país en la explotación de la plata, la goma, el estaño y el gas natural, deben ser debatidos en todos los niveles de la sociedad boliviana.

Somos testigos de los estragos que causa el aceleramiento del calentamiento global; se trabaja en realizar estudios para su medición y reducción, actividades que efectúan investigadores bolivianos y que presentan propuestas y alternativas para una disminución.

Procesos productivos como ser el procesamiento de alimentos, industria del cemento, automatización y confección de ropa; la propuesta de un parque científico tecnológico para la Facultad de Ingeniería en el Campus de Cota Cota y el comercio virtual son abordados en el presente número.

Un agradecimiento a los miembros del Comité Editor por su trabajo desinteresado, ético y profesional en la revisión y selección de los trabajos que se presenta para su consideración.

Seguimos dando pasos seguros en la consolidación de la Revista Industrial 4.0, este quinto número cuenta con el Número Internacional Normalizado de Publicaciones Seriadas (ISSN) en sus versión impresa y digital. Un reconocimiento especial por el apoyo recibido por parte de la Dirección y Personal de la Biblioteca Central de la Universidad Mayor de San Andrés para la obtención de la codificación antes mencionada.

Destacar el gran apoyo que brinda el personal administrativo de la carrera de Ingeniería Industrial, independiente del área al que pertenece, para que se pueda publicar por más de dos años ininterrumpidos la presente revista.

EVIDENCIA DE CALENTAMIENTO GLOBAL EN BOLIVIA

Yuri Roberto Zamorano-Braun¹

ORCID 0000-0002-5746-1946

yuri_zamorano@yahoo.com

Recibido: 10 de octubre; aprobado: 14 de noviembre

1 Resumen

Mucho se ha discutido en los últimos tiempos, en el contexto científico y en diferentes foros de análisis de la temática medio ambiental, sobre Calentamiento Global, Efecto Invernadero y Cambio Climático. El estudio propuesto pretende centrarse en hallar evidencia empírica del Calentamiento Global en Bolivia, entendiéndose al mismo como las variaciones registradas en la temperatura media a lo largo del tiempo con información del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y métodos estadísticos.

Los métodos utilizados fueron de Análisis de Varianza, Regresión con Mínimos Cuadrados Ordinarios y Regresión con Mínimos Cuadrados Robustos. Los tres métodos evidencian incrementos de temperatura en el largo plazo de 0.54°C en el primer caso, 0.85°C en el segundo y 0.71°C en el tercero. Siendo la hipótesis planteada la presencia de evidencia que confirme o refute el Calentamiento Global en Bolivia, preliminarmente es posible responder afirmativamente a este cuestionamiento, sin embargo, la explicación de las causas de estas variaciones no son parte del presente estudio.

2 Abstract

Much has been discussed in recent times, in the scientific context and in different analysis forums on environmental issues, on Global Warming, Greenhouse Effect and

¹ El autor es Ingeniero Industrial con maestrías en Administración de Empresas y Finanzas Corporativas, se desempeña como consultor e investigador independiente. Actualmente es candidato al Doctorado de Ciencias Económicas y Administrativas por la Universidad del Valle – Bolivia.



Climate Change. The proposed study aims to focus on finding empirical evidence of Global Warming in Bolivia, understood as the variations recorded in the average temperature over time with information from the National Service of Meteorology and Hydrology (SENAMHI) and statistical methods.

The methods used were Analysis of Variance, Regression with Ordinary Least Squares, and Regression with Robust Least Squares. The three methods show long-term temperature increases of 0.54°C in the first case, 0.85°C in the second and 0.71°C in the third. Being the hypothesis raised the presence of evidence that confirms or refutes Global Warming in Bolivia, preliminarily it is possible to respond affirmatively to this questioning, however, the explanation of the causes of these variations are not part of the present study.

Palabras Clave. *Calentamiento Global, Cambio Climático, Variaciones de Temperatura, Bolivia.*

3 Introducción

En Bolivia, se han desarrollado diferentes estudios sobre Calentamiento Global y Cambio Climático. Aun cuando la revisión bibliográfica no fue exhaustiva, se infiere que la información referida a cambios de temperatura en nuestro país, como consecuencia del Calentamiento Global, se basa fundamentalmente en análisis realizados mediante modelos de simulación, notándose la ausencia de un estudio que compruebe la hipótesis de incrementos de temperatura sucedidos en Bolivia con base en datos registrados oficialmente.

4 Objetivo

Dado que el Calentamiento Global no se manifiesta de forma uniforme sobre todo el planeta (Andrade 2008), se desea determinar la existencia de cambios de temperatura en diferentes regiones del país apelando a información estadística de la temperatura media registrada por el SENAMHI en algunas de sus estaciones meteorológicas que cuentan con larga data en sus registros, y con ello comprobar o refutar la hipótesis de variaciones de temperatura que puedan atribuirse al Calentamiento Global.

5 Fuente de Datos

Para el estudio se utilizó series de datos de temperaturas medias diarias de estaciones meteorológicas que cumplen tres requisitos: a) Contar con información de larga data (con el fin de minimizar efectos cíclicos y estacionales), b) Sus datos más recientes se encuentren en el presente decenio y, c) La información perdida no supere el 20% de la longitud de la serie. Los datos necesarios fueron proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI)² mismos que fueron seleccionados luego de una revisión exhaustiva de la información de temperatura media disponible de todas las estaciones meteorológicas, decidiendo utilizar datos de 22 estaciones cuyo detalle es el siguiente:

Cuadro N° 1. Estaciones Meteorológicas Seleccionadas

N°	Estación Meteorológica	Zona Geográfica	Departamento	Altura [msnm]	Fecha Inicial	Fecha Final	Días	Datos Disponibles	Datos Perdidos	% Datos Perdidos
1	Ayo-Ayo	Altiplano	La Paz	3.888	01/10/1957	30/06/2018	22.188	21.241	947	4%
2	Laykacota	Altiplano	La Paz	3.632	01/01/1945	26/07/2018	26.870	23.563	3.307	12%
3	Mojo	Altiplano	Potosí	3.400	01/01/1943	31/05/2018	27.545	25.415	2.130	8%
4	Oruro Aeropuerto	Altiplano	Oruro	3.702	01/03/1945	31/07/2018	26.816	22.833	3.983	15%
5	Potosí Los Pinos	Altiplano	Potosí	3.950	01/05/1942	30/07/2018	27.850	25.249	2.601	9%
6	Viacha	Altiplano	La Paz	3.850	01/07/1959	31/05/2015	20.424	17.126	3.298	16%
7	Camiri Aeropuerto	Llanos	Santa Cruz	810	10/05/1962	31/07/2018	20.537	19.599	938	5%
8	Riveralta	Llanos	Beni	141	01/08/1957	31/07/2018	22.280	19.776	2.504	11%
9	Rurrenabake Aeropuerto	Llanos	Beni	204	07/09/1957	31/07/2018	22.243	20.481	1.762	8%
10	Trinidad Aeropuerto	Llanos	Beni	156	01/08/1957	31/07/2018	22.280	21.760	520	2%
11	Trompillo Aeropuerto	Llanos	Santa Cruz	413	01/02/1949	31/07/2018	25.383	24.575	808	3%
12	Yacuiba Aeropuerto	Llanos	Tarija	580	08/05/1962	31/07/2018	20.539	19.787	752	4%
13	Arani	Valles	Cochabamba	2.767	09/07/1957	31/12/2017	22.091	21.270	821	4%
14	Capinota	Valles	Cochabamba	2.406	24/01/1957	31/12/2017	22.257	21.747	510	2%
15	Cochabamba Aeropuerto	Valles	Cochabamba	2.548	01/04/1949	31/07/2018	25.324	24.917	407	2%
16	Mizque	Valles	Cochabamba	2.045	04/01/1948	30/04/2017	25.320	20.720	4.600	18%
17	Ravelo	Valles	Potosí	3.200	01/08/1967	31/03/2018	18.506	16.519	1.987	11%
18	Sucre Senamhi	Valles	Chuquisaca	2.840	01/09/1943	31/07/2018	27.363	25.507	1.856	7%
19	Tarabuco	Valles	Chuquisaca	3.284	25/09/1942	31/03/2018	27.582	21.960	5.622	20%
20	Tarata	Valles	Cochabamba	2.775	01/09/1957	31/12/2017	22.037	21.772	265	1%
21	Tarija Aeropuerto	Valles	Tarija	1.875	15/05/1962	31/07/2018	20.532	18.628	1.904	9%
22	Tiraque	Valles	Cochabamba	3.304	01/01/1955	31/12/2017	23.011	22.040	971	4%

Fuente: Elaboración propia

² Se agradece la colaboración prestada por su Director General el Met. J. Gualberto Carrasco Miranda y del Lic. J. Mario Cavero Almanza quien colectó la información solicitada.

Las ubicaciones de estas estaciones, utilizando las coordenadas georreferenciadas, se aprecia en la siguiente figura:

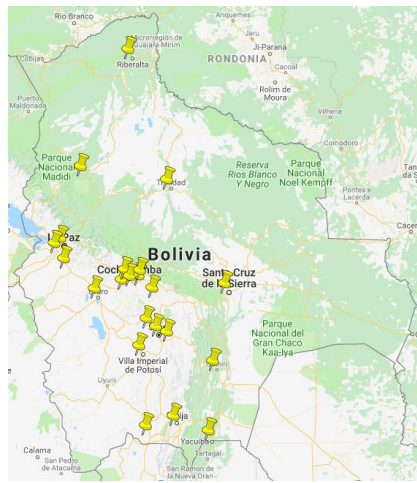


Figura 1. Ubicación de estaciones meteorológicas seleccionadas

6 Metodología

La metodología utilizada, se fundamenta en dos modelos estadísticos que a continuación se explican.

6.1 Análisis de Varianza de un Factor - ANOVA

Prueba paramétrica que permite probar la significancia de las diferencias entre más de dos medias muestrales. Usando el análisis de varianza, es posible realizar inferencia acerca de si las muestras se tomaron de poblaciones que tienen la misma media (Levin y Rubin 2004). Los supuestos para emplear este método estadístico (Anderson, Sweeney y Williams 2008), son:

1. En cada población, la variable de respuesta tiene una distribución normal (Normalidad de los subgrupos).
2. La varianza de la variable de respuesta, que se denota σ , es la misma en todas las poblaciones (Homogeneidad de varianzas u homocedasticidad).
3. Las observaciones deben ser independientes.

A los supuestos antes mencionados, se suma que los tamaños de las muestras sean iguales (o similares), para que el análisis de varianza no sea sensible a desviaciones

de la suposición de que las poblaciones están distribuidas de manera normal (Equivalencia de subgrupos).

Las hipótesis de este modelo son:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

$$H_1: \text{No todas las medias poblacionales son iguales}$$

El estadístico de prueba o contraste proviene de una distribución F de Fisher-Snedecor con $k - 1$ grados de libertad en el numerador y $n - k$ grados de libertad en el denominador.

6.2 Análisis de Regresión Lineal con Mínimos Cuadrados Ordinarios

Se aplica el análisis de regresión que consiste básicamente en ajustar la información a una función (lineal), de tal manera que la variable regresora (el tiempo en días) explica la evolución de la variable independiente (la temperatura media diaria).

El objetivo principal del análisis de regresión es estimar la función de regresión poblacional a partir de la función de regresión muestral que tiene la forma:

$$y_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \cdot x_i + \hat{u}_i$$

Donde $\hat{\beta}_0$ y $\hat{\beta}_1$ son los estimadores de la constante o intercepto, y de la pendiente respectivamente. Asimismo, $\hat{u}_i$ son los errores de la estimación llamadas también residuos o perturbaciones (Gujarati y Porter 2010). Estos estimadores se obtienen mediante el Método de Mínimos Cuadrados Ordinarios.

Este modelo está sujeto a una serie de supuestos con respecto a los errores (Anderson, Sweeney y Williams 2008), los cuales son:

1. El término del error $\hat{u}_i$ es una variable aleatoria cuya media, o valor esperado, es cero.
2. La varianza de $\hat{u}_i$, que se denota σ^2 , es la misma para todos los valores de x_i (Homocedasticidad).
3. El término del error $\hat{u}_i$ es una variable aleatoria distribuida normalmente.
4. No hay autocorrelación entre las perturbaciones, o sea, dados dos valores cualesquiera de x_i y x_j , la correlación entre dos $\hat{u}_i$ y $\hat{u}_j$ es cero. En pocas

palabras, estas observaciones se muestrean de manera independiente o lo que es lo mismo, los valores de $\hat{u}_i$ son independientes.

La Bondad del Ajuste o el grado en el que la función de regresión muestral se ajusta a los datos, se evalúa con el Coeficiente de Determinación R^2 que mide la calidad del ajuste siendo mayor cuanto más se aproxima este estadístico a la unidad. También interesa inferir sobre la validez de los estimadores $\hat{\beta}_0$ y $\hat{\beta}_1$ de la constante y la pendiente definiendo pruebas de significancia sobre los estimadores, y siendo la pendiente $\hat{\beta}_1$ el principal estimador (ya que el intercepto está en función al sistema de coordenadas utilizado y su significación en el presente análisis no conlleva relevancia), el análisis se centra en este estadístico, sobre el cual es posible definir una prueba de hipótesis con la siguiente forma:

$$H_0: \beta_1 = 0$$

$$H_1: \beta_1 \neq 0$$

La que se comprueba aproximando el sesgo producido entre el estimador y el valor nulo $\left(\frac{\beta_1 - 0}{s_{\beta_1}}\right)$ a una distribución t-Student con $n - 2$ grados de libertad y un nivel de significación α , donde s_{β_1} es la desviación estándar del estimador. Si se rechaza H_0 , concluye que $\beta_1 \neq 0$, implicando que entre las dos variables existe una relación estadísticamente significativa. Para el caso particular del presente estudio, indicará que existe una variación en la temperatura media diaria con respecto al tiempo transcurrido.

7 Preparación de los Datos

Los datos para el estudio se preparan y acomodan para ser analizados mediante dos sistemas informáticos: Statistical Package for Social Sciences – SPSS (Castañeda, y otros 2010) y EViews (Startz 2015). Los supuestos de cada modelo fueron probados con las técnicas estadísticas respectivas.³

³ Un análisis detallado puede ser solicitado directamente al autor.

7.1 ANOVA

Para el análisis de varianza (ANOVA), los datos de cada estación meteorológica se ordenan en tres campos principales: un campo de fecha ordenado cronológicamente desde la fecha más antigua hasta la más reciente, un campo con los valores de la temperatura media diaria y un tercer campo con un identificador o índice (para el caso particular: 1, 2 y 3) que separa la muestra en tres subgrupos: un primer subgrupo con los datos más antiguos (Segmento Antiguo), un segundo grupo con datos intermedios en la cronología (Segmento Intermedio) y un tercer grupo con los datos más recientes (Segmento Reciente). Para cumplir con el supuesto de tamaños de muestras iguales (subgrupos equivalentes), se divide la data total en los tres segmentos de forma equitativa, obviando la data perdida o faltante.

7.2 Regresión Lineal

Para el análisis de regresión, se ordena la información en dos campos: un campo de fecha ordenado cronológicamente desde la fecha más antigua hasta la más reciente para ser utilizado como la variable regresora y un campo con los valores de la temperatura media diaria observada como variable independiente.

8 Determinación de las Variaciones en la Temperatura

8.1 ANOVA

Al comprobarse estadísticamente la diferencia de medias, ya sea mediante el procedimiento estándar de análisis de varianza (ANOVA) o mediante los métodos robustos, el siguiente paso es determinar las variaciones de temperatura entre los tres segmentos de temperatura especificados (Antiguo, Intermedio y Reciente). La vía para obtener estas variaciones, es realizar la diferencia de las medias de los tres segmentos, pero en este caso persiste una duda relacionada a la hipótesis alterna del ANOVA, misma que al comprobarse, sostiene que al menos un par de estas medias no es estadísticamente diferente y no existe certeza para el caso del estudio, que las tres medias de los tres segmentos calculados difieran significativamente en términos estadísticos. Para salvar esta disyuntiva, se utiliza dos métodos para determinar si estas diferencias son significativas a un nivel de 5%. Estas pruebas son: el test HSD



(Honestly Significant Difference) de Tukey de Diferencia Honestamente Significativa, que se aplica cuando se ha comprobado el supuesto de homocedasticidad de los segmentos y la prueba de Games Howell, que se aplica cuando se comprueba la heterocedasticidad de los segmentos.

8.2 Regresión Lineal

En el caso del análisis de regresión lineal y luego de comprobarse estadísticamente la significancia del estimador de la pendiente β_1 , en realidad se obtiene un dato que muestra el cambio relativo de la temperatura en función del tiempo. Las unidades en las que se expresa la pendiente son $\frac{^{\circ}C}{día}$, por lo tanto, conociendo las fechas del intervalo inicial y final que comprende la información utilizada, es posible determinar el número total de días en este intervalo. Al multiplicar esta cantidad de días por la pendiente estimada, se obtiene la variación de temperatura en $^{\circ}C$ para dicho intervalo. El mismo criterio es posible aplicar para otros intervalos.

9 Resultados del Análisis

9.1 Análisis de Varianza

En el siguiente cuadro se resumen varios test realizados en torno al análisis de varianza:

- a) En la primera parte, se aprecia la prueba de Levene para verificar la homocedasticidad de las series.
- b) Posteriormente se observa los resultados del análisis de varianza en cuatro partes: primero la prueba ANOVA estándar, luego las pruebas robustas de Welch y Brown Forsythe ante la presencia de heterocedasticidad y finalmente, en añadidura, la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis ante la no normalidad de la distribución de las series.

Cuadro N° 2. Prueba ANOVA (Complementada con Pruebas Robustas y No Paramétricas)

N° Estación Meteorológica		Homogeneidad de Varianzas	ANOVA Comparación de Medias (Con Pruebas Robustas y No Paramétricas)							
		Estadístico de Levene	p(Levene)	F	p(F)	Test de Welch	p(Welch)	Test de Brown-Forsythe	p(Brown-Forsythe)	p(Kruskal-Wallis)
1	Ayo-Ayo	46,21	0,000	40,16	0,000	40,65	0,000	40,16	0,000	0,000
2	Laykacota	21,48	0,000	1.538,91	0,000	1.543,38	0,000	1.538,90	0,000	0,000
3	Mojo	63,27	0,000	809,69	0,000	869,99	0,000	809,69	0,000	0,000
4	Oruro Aeropuerto	36,64	0,000	392,98	0,000	391,88	0,000	392,98	0,000	0,000
5	Potosí Los Pinos	51,39	0,000	74,97	0,000	80,50	0,000	74,97	0,000	0,000
6	Viacha	270,11	0,000	44,88	0,000	50,61	0,000	44,88	0,000	0,000
7	Camiri Aeropuerto	8,06	0,000	3,42	0,033	3,33	0,036	3,42	0,033	0,001
8	Riveralta	5,70	0,003	293,64	0,000	302,30	0,000	293,64	0,000	0,000
9	Rurrenabake Aeropuerto	2,36	0,095	144,95	0,000	145,37	0,000	144,95	0,000	0,000
10	Trinidad Aeropuerto	8,32	0,000	32,24	0,000	32,86	0,000	32,24	0,000	0,000
11	Trompillo Aeropuerto	0,11	0,900	81,80	0,000	81,43	0,000	81,80	0,000	0,000
12	Yacuiba Aeropuerto	4,74	0,009	16,99	0,000	16,63	0,000	16,98	0,000	0,000
13	Arani	112,12	0,000	100,28	0,000	94,86	0,000	100,28	0,000	0,000
14	Capinota	117,19	0,000	697,74	0,000	683,87	0,000	697,74	0,000	0,000
15	Cochabamba Aeropuerto	170,43	0,000	916,47	0,000	940,24	0,000	916,45	0,000	0,000
16	Mizque	196,11	0,000	515,00	0,000	598,27	0,000	514,99	0,000	0,000
17	Ravelo	25,41	0,000	500,35	0,000	475,95	0,000	500,34	0,000	0,000
18	Sucre Senamhi	49,17	0,000	56,91	0,000	55,61	0,000	56,91	0,000	0,000
19	Tarabuco	54,62	0,000	26,48	0,000	25,10	0,000	26,48	0,000	0,000
20	Tarata	333,23	0,000	526,11	0,000	630,61	0,000	526,09	0,000	0,000
21	Tarija Aeropuerto	0,95	0,388	46,92	0,000	46,45	0,000	46,92	0,000	0,000
22	Tiraque	671,26	0,000	172,02	0,000	161,40	0,000	172,01	0,000	0,000

Fuente: Elaboración propia

Se observa que únicamente tres de las series (Rurrenabake Aeropuerto, Trompillo Aeropuerto y Tarija Aeropuerto) cumplen con el supuesto de homogeneidad de la varianza de las series según el test de Levene. Esto justifica el complementar el estudio con pruebas robustas ante la presencia de heterocedasticidad.

La prueba F para el test de ANOVA comprueba, en todos los casos al nivel de significación del 3,3%, la hipótesis alternativa que no todas las medias de las series son iguales, vale decir que se comprueba la existencia de variaciones en la temperatura media diaria entre los segmentos.

Como la prueba F no es concluyente ante la presencia de heterocedasticidad, se realiza las pruebas de Welch y Brown Forsythe. En ambos casos, a un nivel de significación de 3,6% y 3,3% respectivamente, nuevamente se confirma la hipótesis de que no todas las medias de temperatura por segmento son iguales, para cada una de las estaciones meteorológicas.

Finalmente, aunque el Teorema Central del Límite permite mantener el supuesto de normalidad de las series, se añade la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis, y también en este caso se comprueba la hipótesis alternativa de no igualdad de medias al 0,1% de nivel de significación.

Se observa sin embargo que solamente para la estación meteorológica de Camiri Aeropuerto, las pruebas demuestran la hipótesis nula de igualdad de medias a un nivel de significación inferior al 3,3%

Aunque todas las pruebas realizadas demuestran que no todas las medias son iguales, aún queda por determinar cuáles diferencias son significativas. Para ello se añade a continuación los resultados de las pruebas de Tukey (para homocedasticidad de las series) y Games Howell (para heterocedasticidad de las series). Los resultados de estas pruebas coinciden plenamente en sus determinaciones, por lo que las cifras obtenidas se resumen en un solo cuadro.

Las diferencias o variaciones se determinan entre los tres segmentos o subgrupos de datos: Entre el segmento Intermedio y el segmento Antiguo; entre el segmento Reciente y el segmento Antiguo y entre el segmento Reciente y el segmento Intermedio.

Cuadro N° 3. Variación de Temperaturas por Estaciones Meteorológicas [°C]

N°	Estación Meteorológica	Zona Geográfica	Pruebas de Tukey y Games-Howell [°C] (Diferencias Significativas al 5%)			Minigráfico
			Intermedio-Antiguo	Reciente-Intermedio	Reciente-Antiguo	
1	Ayo-Ayo	Altiplano	-0,49 *	0,40 *	-0,09	
2	Laykacota	Altiplano	0,54 *	1,08 *	1,62 *	
3	Mojo	Altiplano	-1,61 *	-0,77 *	-2,38 *	
4	Oruro Aeropuerto	Altiplano	0,50 *	1,14 *	1,65 *	
5	Potosí Los Pinos	Altiplano	-0,21 *	0,48 *	0,27 *	
6	Viacha	Altiplano	0,05	0,43 *	0,47 *	
7	Camiri Aeropuerto	Llanos	-0,01	0,19	0,18	
8	Riveralta	Llanos	0,58 *	0,38 *	0,95 *	
9	Rurrenabake Aeropuerto	Llanos	0,23 *	0,59 *	0,81 *	
10	Trinidad Aeropuerto	Llanos	0,25 *	0,17 *	0,41 *	
11	Trompillo Aeropuerto	Llanos	0,19 *	0,55 *	0,74 *	
12	Yacuiba Aeropuerto	Llanos	0,27 *	0,25 *	0,52 *	
13	Arani	Valles	0,60 *	-0,27 *	0,32 *	
14	Capinota	Valles	-0,28 *	1,97 *	1,69 *	
15	Cochabamba Aeropuerto	Valles	1,09 *	0,98 *	2,07 *	
16	Mizque	Valles	-0,43 *	1,69 *	1,25 *	
17	Ravelo	Valles	-1,59 *	0,32 *	-1,27 *	
18	Sucre Senamhi	Valles	-0,22 *	-0,20 *	-0,41 *	
19	Tarabuco	Valles	-0,05	-0,24 *	-0,29 *	
20	Tarata	Valles	-0,26 *	1,35 *	1,09 *	
21	Tarija Aeropuerto	Valles	0,22 *	0,48 *	0,70 *	
22	Tiraque	Valles	0,24 *	0,40 *	0,64 *	

* → La diferencia de medias es significativa en el nivel de 0,05 (5%).

Fuente: Elaboración propia

El cuadro anterior resume los resultados buscados. Lo primero que salta a la vista en este cuadro, es que no todas las diferencias o variaciones halladas entre los segmentos temporales son significativas. Para el caso de Camiri Aeropuerto, ninguna de las tres variaciones es significativa, y para Ayo-Ayo la diferencia entre sus segmentos Reciente y Antiguo no es significativa; para Viacha y Tarabuco la variación entre sus segmentos Intermedio y Antiguo no son significativas.

Como corolario se puede decir que, no en todos los casos se tiene variaciones de temperatura positiva. En Mojo, Sucre SENAMHI y Tarabuco, las variaciones son negativas en todos los casos mostrando con ello una disminución de la temperatura promedio diaria entre los tres segmentos de datos. En Ayo-Ayo, Potosí Los Pinos, Camiri Aeropuerto, Arani, Capinota, Mizque, Ravelo y Tarata, se observa variaciones negativas entre al menos dos de los segmentos de datos, y en el resto de los casos, las variaciones son positivas entre los tres segmentos de datos.

Para resumir la información, se determina el promedio de las variaciones halladas, considerando las tres zonas geográficas y contabilizando solamente las variaciones significativas estadísticamente. No se discriminan las variaciones negativas, pues indicaría un sesgo forzado por mostrar resultados que evidencien el Calentamiento Global. El producto del cálculo se muestra a continuación:

Cuadro N° 4. Variación de Temperaturas por Regiones Geográficas [°C]

Zona Geográfica	Antiguo a Intermedio	Intermedio a Reciente	Antiguo a Reciente
<i>Intervalo</i>	<i>1953 a 1997</i>	<i>1976 a 2017</i>	<i>1953 a 2017</i>
Altiplano	-0,25	0,46	0,33
Valles	-0,07	0,65	0,58
Llanos	0,30	0,39	0,69
Global	-0,02	0,53	0,54

Fuente: Elaboración propia

9.2 Regresión Lineal

Luego del ajuste realizado por el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios, se aprecia que $\hat{\beta}_1$ es significativo en todos los casos, excepto para el ajuste realizado con los datos de la estación meteorológica de Ayo-Ayo y al haberse comprobado el incumplimiento a los supuestos de homocedasticidad y de no autocorrelación de los residuos⁴, se aplica los ajustes de acuerdo a las pruebas de White y Newey West (HAC) como se aprecia en el siguiente cuadro:

⁴ Se puede solicitar estos cálculos directamente al autor.

Cuadro N° 5. Ajustes ante Heterocedasticidad y Autocorrelación

N°	Estación Meteorológica	Zona Geográfica	Estimación Líneal	Ajustes ante Heterocedasticidad y Autocorrelación			
			MCO ($TM = \alpha + \beta \cdot F$)	White	p(White)	HAC	p(HAC)
			β_1				
1	Ayo-Ayo	Altiplano	-0,000007	-1,71	0,088	1,29	0,196
2	Laykacota	Altiplano	0,000098	57,52	0,000 *	21,02	0,000 *
3	Mojo	Altiplano	-0,000127	-43,11	0,000 *	-12,83	0,000 *
4	Oruro Aeropuerto	Altiplano	0,000093	27,23	0,000 *	8,11	0,000 *
5	Potosí Los Pinos	Altiplano	0,000020	9,78	0,000 *	3,01	0,003 *
6	Viacha	Altiplano	0,000050	11,33	0,000 *	3,46	0,001 *
7	Camiri Aeropuerto	Llanos	0,000014	2,58	0,010 *	0,92	0,356
8	Riveralta	Llanos	0,000060	23,02	0,000 *	10,65	0,000 *
9	Rurrenabake Aeropuerto	Llanos	0,000054	17,41	0,000 *	6,78	0,000 *
10	Trinidad Aeropuerto	Llanos	0,000027	8,30	0,000 *	3,45	0,001 *
11	Trompillo Aeropuerto	Llanos	0,000048	14,13	0,000 *	5,33	0,000 *
12	Yacuiba Aeropuerto	Llanos	0,000042	6,82	0,000 *	2,38	0,017 *
13	Arani	Valles	0,000011	3,91	0,000 *	1,23	0,219
14	Capinota	Valles	0,000105	27,95	0,000 *	8,04	0,000 *
15	Cochabamba Aeropuerto	Valles	0,000120	44,89	0,000 *	15,12	0,000 *
16	Mizque	Valles	0,000061	18,26	0,000 *	5,66	0,000 *
17	Ravelo	Valles	-0,000109	-28,67	0,000 *	-9,79	0,000 *
18	Sucre Senamhi	Valles	-0,000006	-2,96	0,003 *	-1,09	0,277
19	Tarabuco	Valles	-0,000014	-6,31	0,000 *	-2,62	0,009 *
20	Tarata	Valles	0,000057	20,77	0,000 *	6,76	0,000 *
21	Tarija Aeropuerto	Valles	0,000051	9,37	0,000 *	3,55	0,000 *
22	Tiraque	Valles	0,000024	10,31	0,000 *	3,30	0,001 *

* → El coeficiente β_1 es significativo a un nivel de 0.05 (5%).

Fuente: Elaboración propia

El ajuste de White confirma los resultados obtenidos con el modelo estándar MCO en el sentido de que el coeficiente de la variable regresora o pendiente de la recta formulada, es significativo en todos los casos, excepto para el ajuste realizado con los datos de la estación meteorológica de Ayo-Ayo a un nivel de significación de 0,05 (5%).

También se aprecia que, al ser el ajuste de Newey West (HAC) más exigente por efecto de considerar simultáneamente la existencia de heterocedasticidad y autocorrelación, en este caso todos los coeficientes de los ajustes realizados son significativos, excepto los relacionados a las estaciones meteorológicas de Ayo-Ayo, Camiri Aeropuerto, Arani y Sucre SENAMHI a un nivel de significación de 0,05 (5%).

Finalmente, se realiza el ajuste a un modelo de Mínimos Cuadrados Robustos para minimizar los efectos de los datos atípicos de las series. El resultado de este cálculo, es el siguiente:

Cuadro N° 6. Resultados del Ajuste por Mínimos Cuadrados Robustos

N°	Estación Meteorológica	Zona Geográfica	Estimación Líneal MCR (Temperatura= $\beta_0 + \beta_1 \cdot \text{fecha}$)		
			β_1	z	p(z)
1	Ayo-Ayo	Altiplano	-0,000016	-4,01	0,000 *
2	Laykacota	Altiplano	0,000098	56,75	0,000 *
3	Mojo	Altiplano	-0,000131	-40,95	0,000 *
4	Oruro Aeropuerto	Altiplano	0,000088	24,40	0,000 *
5	Potosí Los Pinos	Altiplano	0,000020	9,64	0,000 *
6	Viacha	Altiplano	0,000055	12,98	0,000 *
7	Camiri Aeropuerto	Llanos	0,000019	3,40	0,001 *
8	Riveralta	Llanos	0,000059	28,84	0,000 *
9	Rurrenabaque Aeropuerto	Llanos	0,000055	20,02	0,000 *
10	Trinidad Aeropuerto	Llanos	0,000026	9,63	0,000 *
11	Trompillo Aeropuerto	Llanos	0,000052	17,14	0,000 *
12	Yacuiba Aeropuerto	Llanos	0,000043	6,84	0,000 *
13	Arani	Valles	0,000000	0,07	0,942
14	Capinota	Valles	0,000103	26,08	0,000 *
15	Cochabamba Aeropuerto	Valles	0,000098	39,24	0,000 *
16	Mizque	Valles	0,000064	19,08	0,000 *
17	Ravelo	Valles	-0,000106	-26,81	0,000 *
18	Sucre Senamhi	Valles	-0,000005	-2,39	0,017 *
19	Tarabuco	Valles	-0,000008	-3,92	0,000 *
20	Tarata	Valles	0,000053	17,82	0,000 *
21	Tarija Aeropuerto	Valles	0,000054	10,04	0,000 *
22	Tiraque	Valles	0,000027	11,89	0,000 *

* → El coeficiente β_1 es significativo a un nivel de 0.05 (5%).

Fuente: Elaboración propia

Se encuentra ahora que, los coeficientes β_1 de todas las regresiones son significativos al nivel de 0,05 (5%), excepto el coeficiente del ajuste de los datos de la estación meteorológica de Arani.

Con la información obtenida y considerando la longitud en días de las series obtenida del Cuadro N° 1, se calcula las variaciones de temperatura, utilizando para ello los coeficientes $\hat{\beta}_1$ tanto de los Modelos de Mínimos Cuadrados Ordinarios, como de los Modelos de Mínimos Cuadrados Robustos. Los resultados para las tres Zonas Geográficas, son:

Cuadro N° 7. Variaciones de Temperatura por Estaciones Meteorológicas (MCO y MCR)

N°	Estación Meteorológica	Zona Geográfica	Días en la Serie	Estimación Lineal MCO (Temperatura= $\beta_0 + \beta_1 \cdot \text{fecha}$)	Variación de Temperatura [°C]	Estimación Lineal MCR (Temperatura= $\beta_0 + \beta_1 \cdot \text{fecha}$)	Variación de Temperatura [°C]
				β_1		β_1	
1	Ayo-Ayo	Altiplano	22.188	-0,000007	-0,18	-0,000016	-0,43
2	Laycacota	Altiplano	26.870	0,000098 *	2,00	0,000098	2,00
3	Mojo	Altiplano	27.545	-0,000127 *	-2,83	-0,000131	-2,93
4	Oruro Aeropuerto	Altiplano	26.816	0,000093 *	2,07	0,000088	1,96
5	Potosí Los Pinos	Altiplano	27.850	0,000020 *	0,45	0,000020	0,45
6	Viacha	Altiplano	20.424	0,000050 *	1,02	0,000055	1,13
7	Camiri Aeropuerto	Llanos	20.537	0,000014	0,39	0,000019	0,52
8	Riveralta	Llanos	22.280	0,000060 *	1,23	0,000059	1,22
9	Rurrenabake Aeropuerto	Llanos	22.243	0,000054 *	1,19	0,000055	1,22
10	Trinidad Aeropuerto	Llanos	22.280	0,000027 *	0,75	0,000026	0,71
11	Trompillo Aeropuerto	Llanos	25.383	0,000048 *	1,06	0,000052	1,15
12	Yacuiba Aeropuerto	Llanos	20.539	0,000042 *	0,96	0,000043	1,00
13	Arani	Valles	22.091	0,000011	0,24	0,000000 *	0,00
14	Capinota	Valles	22.257	0,000105 *	2,81	0,000103	2,76
15	Cochabamba Aeropuerto	Valles	25.324	0,000120 *	3,33	0,000098	2,72
16	Mizque	Valles	25.320	0,000061 *	1,25	0,000064	1,31
17	Ravelo	Valles	18.506	-0,000109 *	-2,76	-0,000106	-2,69
18	Sucre Senamhi	Valles	27.363	-0,000006	-0,14	-0,000005	-0,11
19	Tarabuco	Valles	27.582	-0,000014 *	-0,35	-0,000008	-0,20
20	Tarata	Valles	22.037	0,000057 *	1,43	0,000053	1,34
21	Tarija Aeropuerto	Valles	20.532	0,000051 *	0,94	0,000054	1,01
22	Tiraque	Valles	23.011	0,000024 *	0,65	0,000027	0,73

* → El coeficiente β_1 es significativo a un nivel de 0.05 (5%).

Fuente: Elaboración propia

10 Conclusiones

Los resultados obtenidos en el estudio, exponen, en ambos casos, variaciones de temperatura en los periodos analizados para cada modelo según el siguiente detalle:

Cuadro N° 8. Resumen de Resultados [°C]

Método	Análisis de Varianza de un Factor			Regresión Lineal	
	Antiguo a Intermedio	Intermedio a Reciente	Antiguo a Reciente	Mínimos Cuadrados Robustos	Mínimos Cuadrados Ordinarios
Intervalo	1953 a 1997	1976 a 2017	1953 a 2017	1953 a 2017	
Altiplano	-0,25	0,46	0,33	0,37	0,54
Valles	-0,07	0,65	0,58	0,76	0,91
Llanos	0,30	0,39	0,69	0,97	1,04
Global	-0,02	0,53	0,54	0,71	0,85

Fuente: Elaboración propia

Los resultados por ANOVA indican que en el periodo entre 1953 y 1997 se observa decrementos de temperatura del orden de $-0,25^{\circ}\text{C}$ para el Altiplano y $-0,07^{\circ}\text{C}$ para los Valles, mientras que en los Llanos se registra un incremento de temperatura del orden de $0,30^{\circ}\text{C}$. Un análisis global considerando las tres regiones geográficas, revela un decremento de temperatura en razón de $-0,02^{\circ}\text{C}$. Para este primer periodo prevalecería el criterio de un leve decremento de temperatura a nivel nacional.

Para el periodo entre 1976 y 2017, se observa variaciones positivas de temperatura del orden de $0,46^{\circ}\text{C}$ en el Altiplano, $0,65^{\circ}\text{C}$ en los Valles y $0,39^{\circ}\text{C}$ en los Llanos. Una evaluación global en las tres regiones geográficas devela un incremento de temperatura del orden de $0,53^{\circ}\text{C}$.

Si se expande el análisis considerando desde 1953 a 2017, los resultados revelan incrementos de temperatura con variaciones de $0,33^{\circ}\text{C}$ para el Altiplano, $0,58^{\circ}\text{C}$ para los Valles y $0,69^{\circ}\text{C}$ para los Llanos. En el análisis global de las tres regiones geográficas, el resultado es una variación positiva de la temperatura de $0,54^{\circ}\text{C}$.

Para los Modelo de Regresión Lineal mediante Mínimos Cuadrados Ordinarios y Mínimos Cuadrados Robustos, se obtiene incrementos de temperatura en el rango de $0,37^{\circ}\text{C}$ a $0,54^{\circ}\text{C}$ para el Altiplano, $0,76^{\circ}\text{C}$ a $0,91^{\circ}\text{C}$ para los Valles y $0,97^{\circ}\text{C}$ a $1,04^{\circ}\text{C}$ para los Llanos. Globalizando los resultados sin considerar la Zona Geográfica, se tiene incrementos de temperatura en el rango de $0,71^{\circ}\text{C}$ a $0,85^{\circ}\text{C}$.

11 Bibliografía

- Andersen, Lykke, y otros. *La dinámica del cambio climático en Bolivia*. Editado por Lykke Andersen y Luis Carlos Jemio. La Paz: Fundación INESAD, 2015.
- Andersen, Lykke, y Rubén Mamani. «Cambio Climático en Bolivia.» *Economía del Cambio Climático en Sudamérica*, 2009.
- Anderson, David, Dennis Sweeney, y Thomas Williams. *Estadística para Administración y Economía*. Décima Edición. Editado por Sergio Cervantes-González. Traducido por Ma.-del-Carmen Hano-Roa. México DF: Cengage Learning Editores, S.A. de C.V., 2008.
- Andrade, Marcos. «Mitos y verdades acerca del Cambio Climático en Bolivia.» *Revista Boliviana de Física*, nº 14 (2008): 42-49.

- Caballero, Margarita, Socorro Lozano, y Beatriz Ortega. «Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: Una perspectiva desde las ciencias de.» *Revista Digital Universitaria DGSCA-UNAM* 8, n° 10 (Octubre 2007).
- Castañeda, Maria-Belén, Alberto Cabrera, Yadira Navarro, y Wietse de-Vries. *Procesamiento de datos y análisis estadísticos utilizando SPSS*. Porto Alegre: EDIPUCRS – Editora Universitária da PUCRS, 2010.
- Cook, Simon J., Ioannis Kougkoulos, Laura A. Edwards, Jason Dortch, y Dirk Hoffmann. «Glacier change and glacial lake outburst flood risk in the Bolivian Andes.» *The Cryosphere*, n° 10 (2016): 2399-2413.
- Fundación-Solon. «Cambio Climático y Deforestación en Bolivia.» *Tunupa*, n° 102 (2017).
- Gujarati, Damodar, y Dawn Porter. *Econometría*. Quinta Edición. Traducido por Pilar Carril-Villarreal. México DF: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V, 2010.
- IBM. *IBM Knowledge Center*. s.f. <https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/es/>.
- IHS Global Inc. *EViews 9 - User Guide*. 2015.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Cambio Climático 2014 - Informe de Síntesis*. Editado por Equipo-principal-de-redacción, Rajendra K. Pachauri y Leo Meyer. Génova, Suiza: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2015.
- IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. 2013.
- Iwanciw, Javier Gonzales, Luis Alberto Salamanca Mazuelo, Bruno Condori Ali, y Miguel Ángel Ontiveros Mollinedo. *Tras las huellas del cambio climático en Bolivia*. La Paz, 2011.
- Levin, Richard, y David Rubin. *Estadística para Administración y Economía*. Séptima Edición. Editado por Guillermo Trujano-Mendoza. Traducido por Marcia González-Osuna. México DF: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2004.
- Paz-Rada, Oscar, Freddy Tejada-Miranda, Susana Díaz-Cuentas, y Ivar Arana-Pardo. *Vulnerabilidad de los medios de vida ante el cambio climático en Bolivia*. La Paz: Liga de Defensa del Medio Ambiente, 2010.

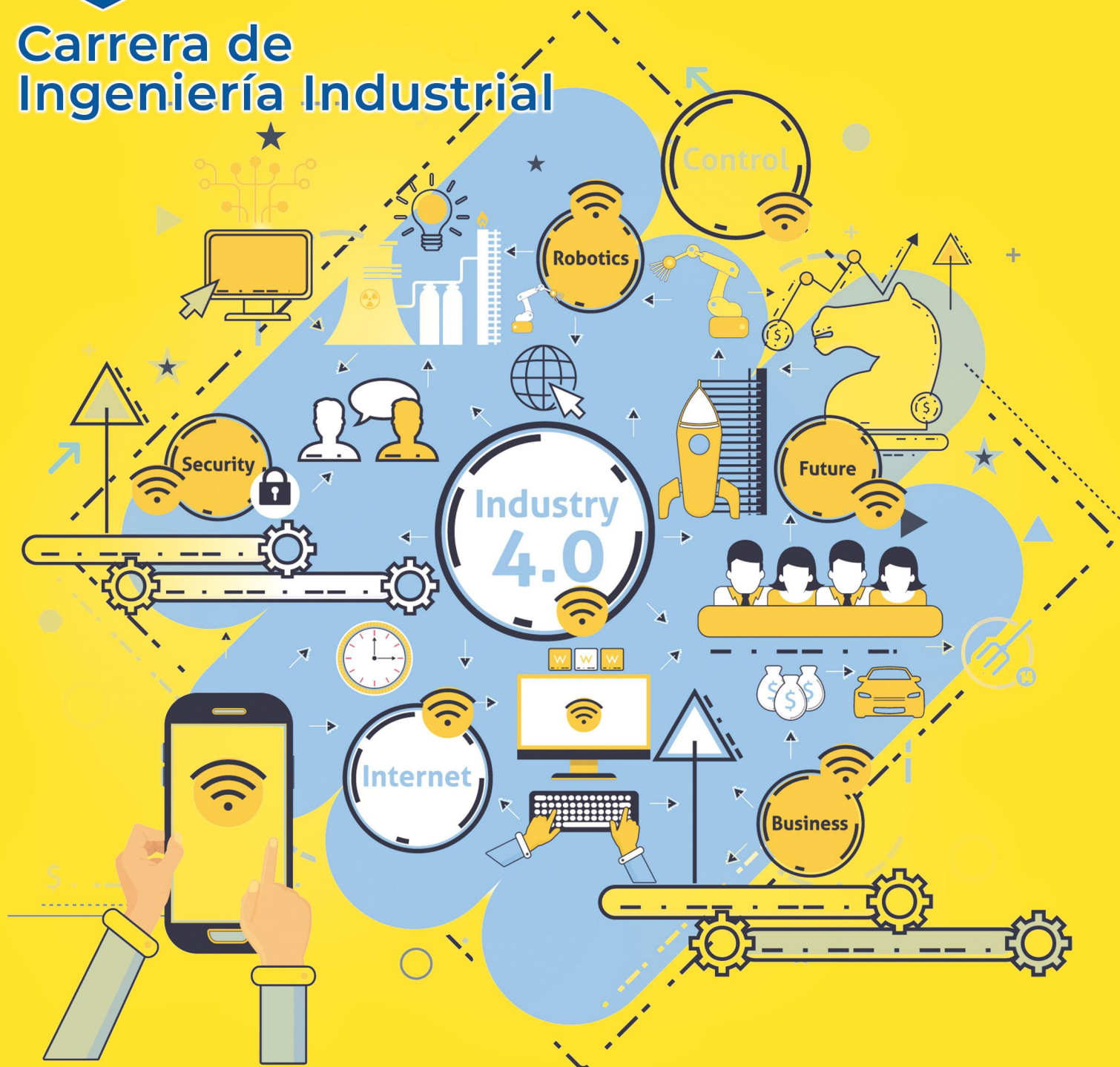


- Startz, Richard. *EViews Illustrated for Version 9*. Editado por Meredith Startz y IHS-Global-Inc. Irvine CA: IHS Global Inc., 2015.
- Ticehurst, Simon, Sagrario Urgel, y Sarah Best. *Bolivia Cambio Climático, Pobreza y Adaptación*. Editado por Simon Ticehurst, Sagrario Urgel y Sarah Best. La Paz: Oxfam Internacional, 2009.
- Valdivia, Corinne, y otros. «Adapting to Climate Change in Andean Ecosystems: Landscapes, Capitals, and Perceptions Shaping Rural Livelihood Strategies and Linking Knowledge Systems.» *Annals of the Association of American Geographers*, 2010.
- Vuille, Mathias, y Raymond S Bradley. «Mean annual temperature trends and their vertical structure in the tropical Andes.» *Geophysical Research Letters* 27, n° 23 (2000).
- Wikipedia, Colaboradores de. *Clima en Bolivia*. Editado por La enciclopedia libre Wikipedia. 24 de agosto de 2018.
https://es.wikipedia.org/wiki/Clima_de_Bolivia#cite_note-1.
- Yaffee, Robert. «Robust Regression Analysis: Some Popular Statistical Package Options.» *Statistics, Social Science, and Mapping Group*, Diciembre 2002.





Carrera de Ingeniería Industrial



Av. Mcal. Santa Cruz N° 1175, Plaza del Obelisco
Mezzanine, Edificio Facultad de Ingeniería
TEI. 2205000-2205067, Int. 1402

Todos los Derechos Reservados - 2022
La Paz - Bolivia

