

ARTÍCULO 4

“Evaluación Geo- Estadística de la radiación solar, a través de imágenes Goes- Datos Observación Meteorológica en el departamento de Tarija”

Geo-statistical evaluation of solar radiation, through Goes images - meteorological observation data in the department of Tarija

Escalante Álvarez Adelaida Evelyn¹

¹ *Docente del Dpto. de Topografía y Vías de Comunicación - Carrera de Ingeniería Civil- Facultad de Ciencias y Tecnología -UAJMS*

¹ **Correspondencia del autor(es):** evita697@gmail.com, dirección.

Resumen

El conocimiento exacto sobre la radiación solar se orienta en su multiplicidad de aplicaciones que contienen nuevas metodologías de generación, fuentes energéticas renovables a un costo bajo. La información solar obtenida en campo, se lo realiza por un conjunto de estaciones de observación con equipamiento e instrumentación especializada, el cual requiere mantenimiento e instalación costosa.

Es importante realizar una evaluación geostatística, comparativa de la información de la irradiación obtenida Global y de Campo, la cual nos facilitará realizar un atlas temático de la radiación evaluada, mediante la interpolación / extrapolación de datos, aplicando la cartografía digital y su integración con módulos GIS.

Los resultados de la evaluación estadística, indican que existe un error en el BIAS de 0.0041, MAE de 0.0103 y RMSE de 0.0174 entre los datos GOES vs. Estación Experimental (de observación directa). Observando que los valores aceptables, son menores a ($\alpha > 0.05$ a 0.95), en la evaluación Geoestadística, del algoritmo Kriging tanto para GOES y Experimental.

Comprobándose que la significancia de error establecido para el BIAS 0.00436, MAE 0.01444 y RMSE de 0.01883, demostrando así que la significancia de error entre estas, son para el BIAS 0.00028, MAE 0.00413 y RMSE 0.00148 comprobando así, la información generada por GOES son aceptables en la calidad de medición, como el grado de incertidumbre en su precisión está por 95% de aceptabilidad, validados por los modelos conseguidos en la interpolación y extrapolación geostatística. Obteniendo de esta manera una colección de mapas de radiación solar para el departamento de Tarija.

Palabras claves:

Radiación Solar, Teledetección, Goes, Evaluación Geoestadística, Kriging

Abstract:

The exact knowledge about solar radiation is oriented in its multiplicity of applications that contain new generation methodologies, renewable energy sources at a low cost. The solar information obtained in the field is carried out by a set of observation stations with

specialized equipment and instrumentation, which requires expensive maintenance and installation.

It is important to carry out a geostatistical, comparative evaluation of the Global and Field irradiation information obtained, which will facilitate us to make a thematic atlas of the evaluated radiation, through the interpolation / extrapolation of data, applying digital cartography and its integration with modules.

The results of the statistical evaluation indicate that there is an error in the BIAS of 0.0041, MAE of 0.0103 and RMSE of 0.0174 between the GOES vs. Experimental Station (direct observation). Observing that the acceptable values are less than ($\alpha > 0.05$ to 0.95), in the Geostatistical evaluation, of the Kriging algorithm for both GOES and Experimental.

Checking that the error significance established for BIAS 0.00436, MAE 0.01444 and RMSE of 0.01883, thus demonstrating that the error significance between these, are for BIAS 0.00028, MAE 0.00413 and RMSE 0.00148 thus checking, the information generated by GOES are acceptable in the quality of measurement, as the degree of uncertainty in its precision is by 95% of acceptability, validated by the models obtained in the geostatistical interpolation and extrapolation. Obtaining in this way a collection of solar radiation maps for the department of Tarija.

Keywords:

Solar Radiation, Remote Sensing, Goes, Geostatistical Evaluation, Kriging

1. Introducción

La energía solar es producida en función del sol, catalogándose en un factor importante para la determinación del potencial energético, que mediante procesos de interacción espacio tiempo con la atmósfera terrestre incide en la tierra en forma de radiación solar.

Es así que para obtener datos de la incidencia solar han desarrollado equipos tecnológicos

que obtienen esa información de acuerdo a una geo-espacialización de tiempo y lugar, sin embargo, estos datos han presentado variabilidades de comportamiento espacio-temporal, que nos permiten definir de manera precisa las características principales de este recurso, los más esenciales son: Diversidad en la serie de datos en función a los intervalos del tiempo de medición, distribución e inexistencia de algunas estaciones de medición en la zona de estudio.

A causa de estos problemas surgen metodologías para estimar la radiación de manera automatizada y globalizada, una de las más usadas es por medio de la Teledetección en base a imágenes de satélites meteorológicos, principalmente los satélites GOES 16, creados por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos, con la NASA), está siendo utilizado globalmente con un alcance de captura de información en una imagen del disco entero de la Tierra cada 15 minutos.

Con las imágenes capturadas por estos dispositivos y a partir de técnicas de Teledetección, se podrán crear modelos digitales espaciotemporales y estadísticos, que nos permitirán evaluar el mejor potencial de la radiación solar en superficie, a través de datos de los satélites GOES-16.

Estudios en América del Sur han desarrollado investigaciones (Empleo de Imágenes Satelitales GOES en el Cálculo de la Irradiación Solar Global en Distintas Zonas de Argentina (Righini, 2004), Aplicaron el modelo estadístico de Tarpley empleando imágenes del satélite GOES- 8 y 16, para el período de mayo de 2000 a enero de 2001 sobre cinco localidades en Argentina; se encontraron errores promedio de estimación en los datos diarios y en los medios mensuales.

A la fecha y en el contexto nacional se encuentran investigaciones sobre la estimación de la Radiación Solar en Bolivia, utilizando modelos S.I.G. e Imágenes Satelitales; un estudio realizado por Marcelo Lucano, determinó un mapa de radiación solar para Cochabamba (Lucano, 2016), pero que

no implica la calidad de información estimada no en la capacidad, sino en la calidad de datos emitidos globalmente. A nivel departamental de Tarija no se tiene ningún estudio en el contexto de la radiación solar como tal.

Los trabajos mencionados anteriormente ponen de manifiesto la variabilidad de la utilización de IMÁGENES DE SATÉLITE, sin embargo ninguno de los estudios realiza la evaluación cualitativa de la información, al estar directamente correlacionada con los datos solares emitidos por sensores remotos, se considera a esta variable, importante para la investigación de la evaluación geoestadística de los datos solares obtenidos por imágenes GOES-16 /estación experimental U.A.J.M.S. y cuantificar el grado de mejor potencial de la radiación solar y su correspondiente mapeo cartográfico digital en el departamento de Tarija

2. Objetivo general

Evaluar los datos de información solar obtenidos por medio del satélite GOES/ Estación experimental UAJMS, para la estimación de la radiación solar en relación a su potencial de incidencia.

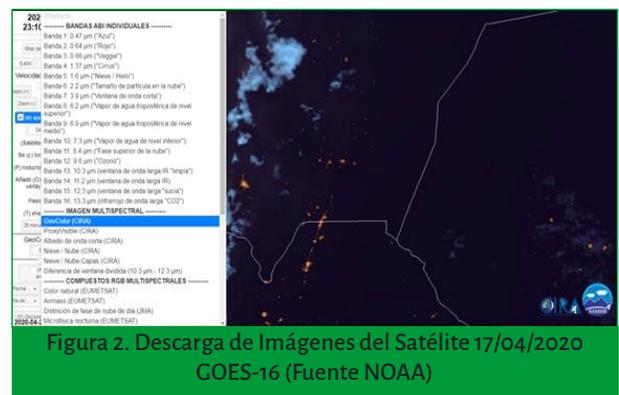
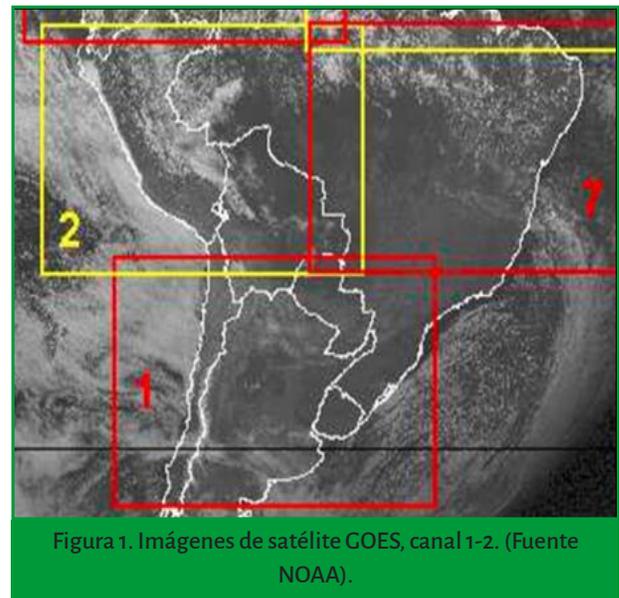
2.1. Objetivos específicos

- ⊙ Analizar la información de energía solar emitido por el satélite GOES-16/ U.A.J.M.S.
- ⊙ Caracterizar los datos óptimos de la incidencia solar por medio de la interpolación.
- ⊙ Determinar los estándares admisibles en el modelamiento geoestadístico.
- ⊙ Realizar la Cartografía Temática Digital de la Radiación Solar de todo el Departamento de Tarija.

3. Materiales y métodos

Imágenes GOES de fechas 11,13,15,17,20,22 de noviembre del año 2019 derivada del satélite Geostationary Operational Environmental Satellite GOES) con una resolución espacial de 1 Km², y temporal de 30 minutos, adquiridas del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) donde se realizó la búsqueda, obtención y descarga de la información solar, obtenidas desde la página <https://www.bou.class.noaa.gov/saa/products/resultsAVHRR>.

IMÁGENES GOES



3.2. Procesamiento de imágenes GOES -16

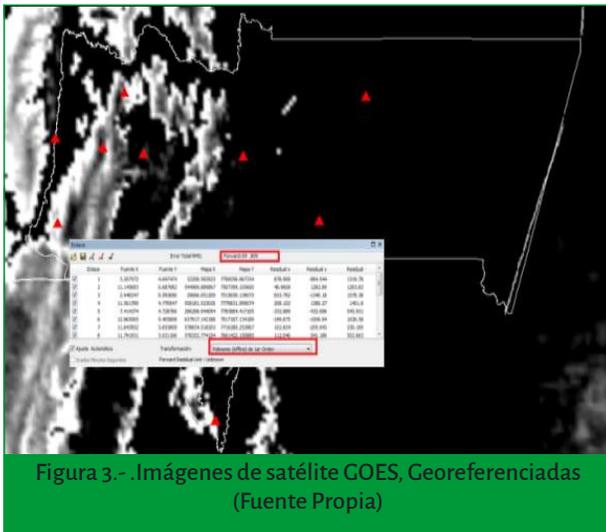


Figura 3.- Imágenes de satélite GOES, Georeferenciadas (Fuente Propia)

3.1. Instrumentación y Metodología



Figura 4. Piranómetro recolección de información solar (Fuente propia)



Figura 5. Computadora Corel i7 en la descarga de información solar de las estaciones Experimentales utilizada en la investigación. (Fuente propia)

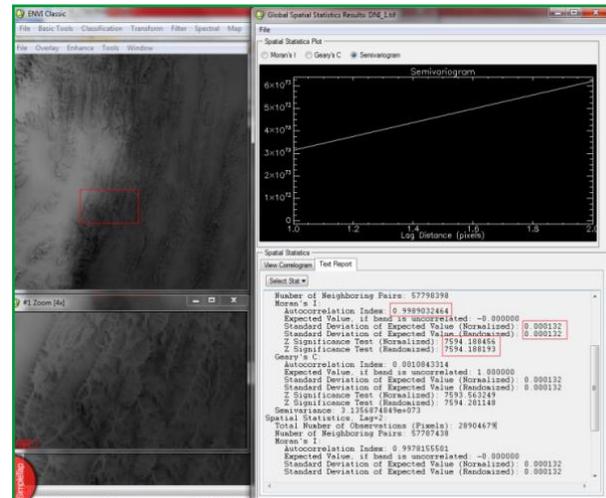


Figura 6. Análisis Geoespacial Datos solares DNI, DIF, GHI, GTI Envi (Fuente Propia)

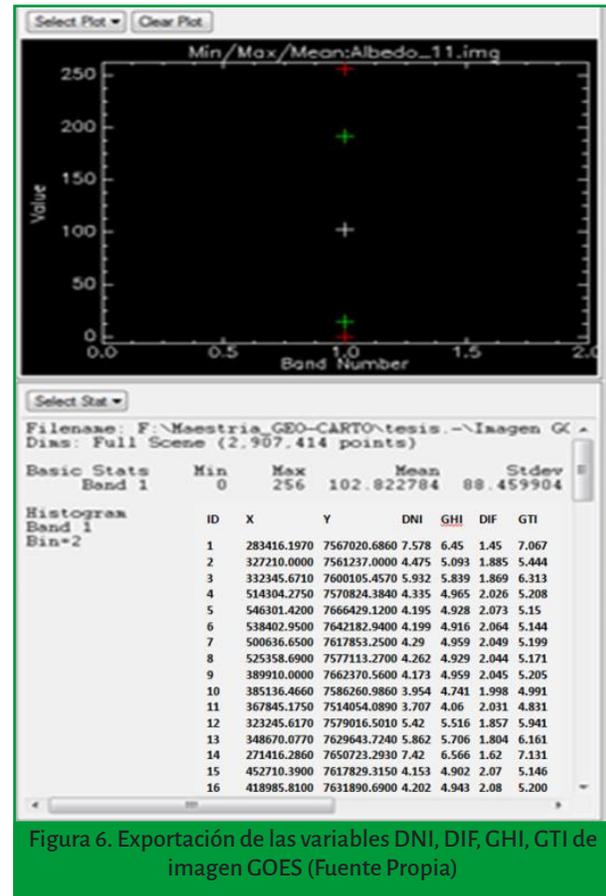


Figura 6. Exportación de las variables DNI, DIF, GHI, GTI de imagen GOES (Fuente Propia)

3.3. Análisis estadístico de calidad de los distintos elementos solares Goes- Estación experimental

Aplicamos los métodos estadísticos a toda la información obtenida, es decir, a datos GOES-16 y los de medición experimental, presentando la planilla correspondiente del análisis. Lo cual se obtiene resultados estadísticos en los siguientes rangos establecidos.

3.3.1. Error Medio Cuadrático RMSE

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_j)^2}{N}}$$

Dónde:

y_i =es el valor de rradiancia de la imagen Goes

y_j =es la rradiancia real medida

N =es el número de pares de valores modelados.

Los resultados también pueden ser expresados de los límites del intervalo de confianza de 95%, según recomendaciones de estimaciones de calidad para datos geospaciales para dar cuenta de la variabilidad de las estimaciones de estos parámetros. (Goovaerts, 2007)

3.3.2. Error Medio o Bias

El error medio, también llamado Sesgo o Bias, indica la dirección promedio de la desviación de valores observados, pero no puede reflejar la magnitud del error. Mide el error promedio de un número de observaciones encontradas tomando el valor medio de los errores positivos y negativos sin hacer caso de la señal. (Sandoval, 2017)

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_j)}{N}$$

- ⊙ Si Bias > 0, sesgo positivo señala que el valor estimado sobre estima el valor obedecido en promedio

- ⊙ Si Bias < 0, sesgo negativo corresponde a una subestimación del valor promedio. (Goovaerts, 2007)

3.3.3. Error medio absoluto (MAE)

El error medio absoluto, mide la magnitud promedio de los errores de un set de valores estimados, sin considerar su dirección. El error medio absoluto es una puntuación lineal que quiere decir que todas las diferencias individuales tienen el mismo peso en función al promedio. (Sandoval, 2017)

$$MAE = \sum_{i=1}^N \frac{|\hat{x}^i - x^i|}{N}$$

$$Error\ absoluto\ (\%) = 100 \frac{MAE}{\bar{x}^i}$$

3.3.4. Coeficiente de correlación de Pearson.

El coeficiente de correlación de Pearson es un índice estadístico que mide la relación lineal entre dos variables cuantitativas. A diferencia de la covarianza, la correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables. (Goovaerts, 2007). El cálculo del coeficiente de correlación lineal se realiza dividiendo la covarianza por el producto de las desviaciones estándar de ambas variables:

$$r = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \cdot \sigma_Y}$$

Siendo:

- ⊙ σ_{XY} la covarianza de (X,Y)
- ⊙ σ_X y σ_Y las desviaciones típicas de las distribuciones marginales.

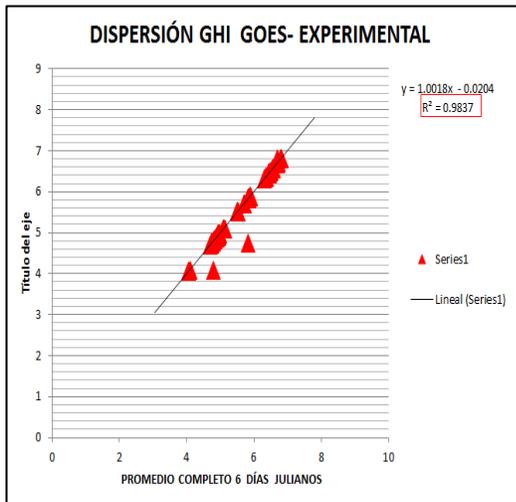
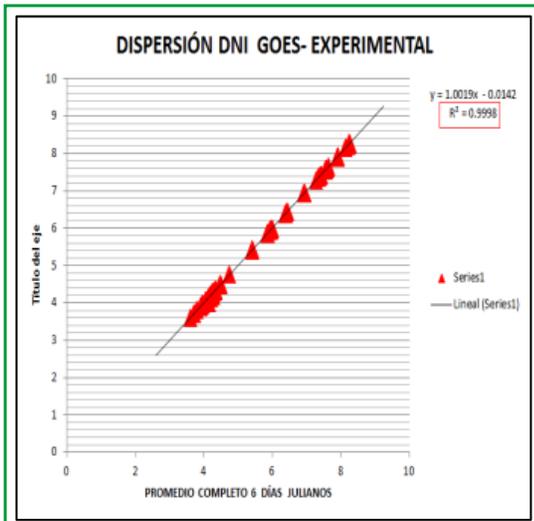


Figura 7. Cuadro de datos de la dispersión y línea de tendencia DGNI-GHI (Fuente Propia)

3.4. Análisis Geo-Estadístico de calidad de los distintos modelos de representación (Geo-Estatistical análisis en el ARCGIS 10.3)

Inicialmente y con el objetivo de explorar y comprobar la bondad de los datos solares, analizados estadísticamente, normalizadas y promediados; la comprobación realizada fue en el Geostatistical Analyst del software ArcGIS. 10.3, cuyos valores obtenidos en la desviación estándar es de (0.2585 DNI, 0.1331, GHI, 0.1264, DIF, 0.1405 GTI), lo cual se encuentra dentro del valor ($\sigma = 0,69$), tal como se muestra en los cuadros posteriores descriptos. (Schmit, 2012)

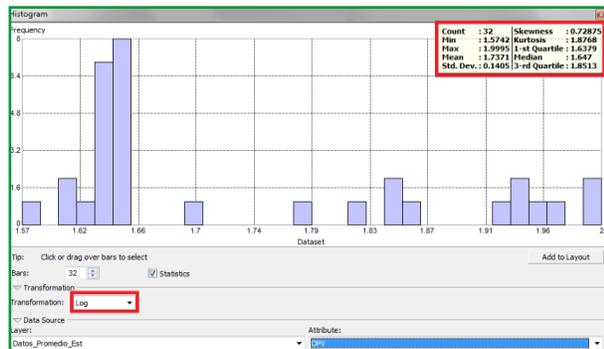


Figura 8. Determinación de la Desviación Estándar datos GOES (Fuente Propia)

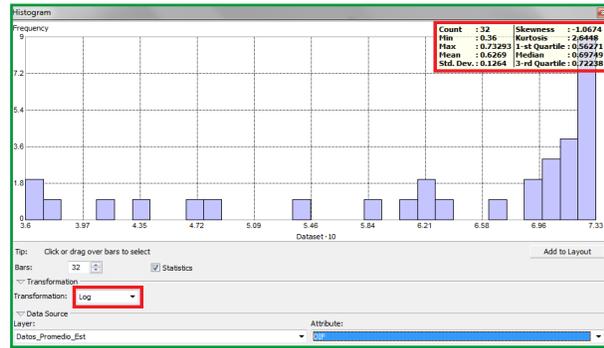


Figura 9. Determinación de la Desviación Estándar datos Estación Experimental (Fuente Propia).

3.4.1. Semivariogramas.

El rango obtenido en el gráfico de predicción de GOES vs Experimental, muestra una buena correlación y exactitud en la predicción. Los semivariogramas determinados muestran un rango de valor admisible de 0.01183467 para los datos solares interpolados de la estación experimental y un valor de 0.011867281, para los datos del GOES; de la interpretación de datos se indica que existe una alta correlación de la información, tal como lo muestra el gráfico.

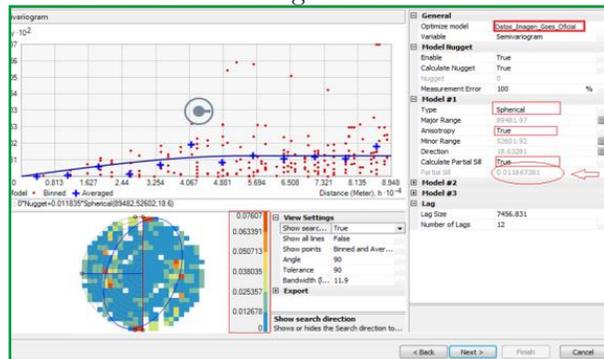
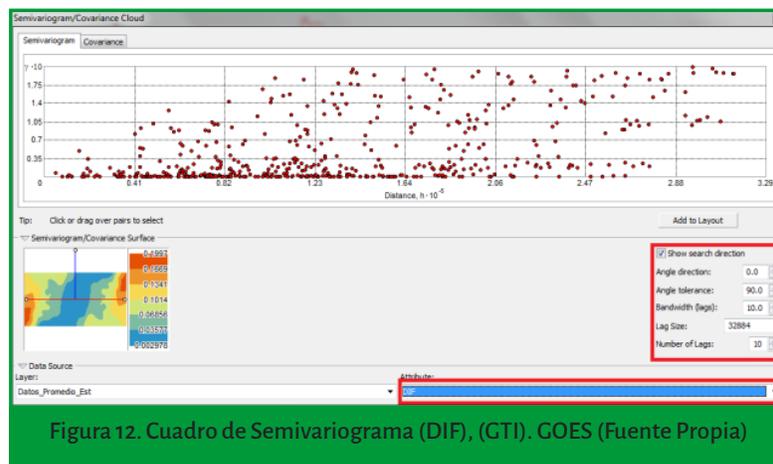
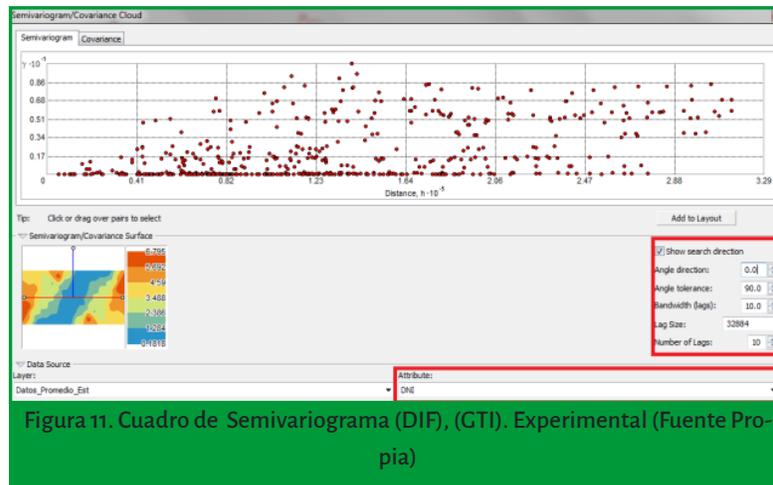


Figura 10. Cuadro de Semivariograma (DNI), (GHI). GOES (Fuente Propia)

3.4.2. Análisis del Semivariograma de la normalización de Datos Radiación (DNI), GHI), (DIF), (GTI) Experimental.



4. Resultados y Discusión.

4.1. Estadístico

En base al análisis estadístico univariado, de datos solares de la Estación Experimental y las imágenes GOES, se obtuvieron los resultados correspondientes de los errores (BIAS, MAE, RMSE) de las variables (DNI, DIF, GHI, GTI) en una muestra de 32 estaciones.

Los valores obtenidos nos muestran una fiabilidad alta y positiva a la evaluación de datos, cuyo promedio es de BIAS 0.0041, MAE 0.013, RMSE 0.0174 son menores que ($\alpha < 0.05$), tal como lo muestra la tabla siguiente.

| CUADRO DE RESUMEN DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO (ERRORES MAE-BIAS-RM SE) | | | | | | | | | | | |
|--|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| BIAS | | | | MAE | | | | RM SE | | | |
| BIAS (DNI) | BIAS (GHI) | BIAS (DIF) | BIAS (GTI) | MAE (DNI) | MAE (GHI) | MAE (DIF) | MAES (GTI) | RMSE (DNI) | RMSE (GHI) | RMSE (DIF) | RMSE (GTI) |
| 0.005 | 0.011 | 0.002 | -0.001 | 0.008 | 0.015 | 0.007 | 0.012 | 0.011 | 0.03 | 0.01 | 0.018 |
| 0.0041 | | | | 0.0103 | | | | 0.0174 | | | |

Tabla 1. Cuadro de Resultados Análisis Estadístico BIAS. MAE – RMSE (Fuente Propia)

| Análisis estadístico de error datos solares imágenes GOES vs mediciones directas experimental | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| N° | Estación | BIAS | | | | MAE | | | | RM SE | | | |
| | | BIAS (DNI) | BIAS (GHI) | BIAS (DIF) | BIAS (GTI) | MAE (DNI) | MAE (GHI) | MAE (DIF) | MAES (GTI) | RMSE (DNI) | RMSE (GHI) | RMSE (DIF) | RMSE (GTI) |
| 1 | Huallajara | 0.003 | 0.001 | 0.000 | 0.002 | 0.004 | 0.002 | 0.002 | 0.003 | 0.005 | 0.002 | 0.003 | 0.003 |
| 2 | Cachimayu | 0.004 | 0.007 | 0.003 | 0.003 | 0.004 | 0.008 | 0.003 | 0.004 | 0.005 | 0.014 | 0.004 | 0.004 |
| 3 | Calamuchita | 0.003 | 0.004 | 0.002 | 0.003 | 0.005 | 0.007 | 0.004 | 0.008 | 0.006 | 0.008 | 0.005 | 0.009 |
| 4 | Las Moras | 0.003 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.004 | 0.004 | 0.002 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.003 | 0.006 |
| 5 | Los Galpones | 0.014 | -0.003 | 0.010 | -0.006 | 0.016 | 0.009 | 0.010 | 0.012 | 0.008 | 0.015 | 0.021 | 0.020 |
| 6 | Las Bandurrias | 0.004 | 0.002 | 0.000 | 0.001 | 0.005 | 0.007 | 0.004 | 0.004 | 0.006 | 0.009 | 0.005 | 0.005 |
| 7 | Ibibobo | 0.018 | 0.011 | -0.004 | 0.012 | 0.018 | 0.011 | 0.012 | 0.012 | 0.007 | 0.017 | 0.015 | 0.021 |
| 8 | Los Valdez | -0.001 | -0.001 | 0.002 | -0.001 | 0.009 | 0.009 | 0.004 | 0.009 | 0.004 | 0.004 | 0.004 | 0.005 |
| 9 | Ñaurenda | 0.004 | 0.006 | 0.003 | 0.001 | 0.006 | 0.006 | 0.003 | 0.003 | 0.007 | 0.007 | 0.003 | 0.004 |
| 10 | Chiquiaca Norte | 0.004 | -0.001 | 0.004 | 0.004 | 0.004 | 0.006 | 0.006 | 0.004 | 0.006 | 0.009 | 0.007 | 0.005 |
| 11 | Playa ancha | 0.005 | 0.003 | 0.002 | 0.004 | 0.005 | 0.003 | 0.002 | 0.004 | 0.006 | 0.003 | 0.002 | 0.004 |
| 12 | Padcaya | 0.003 | 0.001 | 0.003 | 0.005 | 0.005 | 0.004 | 0.003 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.003 | 0.005 |
| 13 | Junacas | 0.006 | 0.001 | 0.003 | 0.007 | 0.008 | 0.005 | 0.004 | 0.010 | 0.009 | 0.006 | 0.005 | 0.013 |
| 14 | El puente | -0.001 | 0.003 | 0.002 | 0.005 | 0.003 | 0.004 | 0.003 | 0.007 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 15 | Palmar Grande | 0.003 | 0.004 | 0.010 | -0.002 | 0.006 | 0.006 | 0.011 | 0.007 | 0.007 | 0.007 | 0.021 | 0.010 |
| 16 | Palos Blancos | 0.005 | 0.002 | 0.005 | 0.013 | 0.006 | 0.006 | 0.005 | 0.015 | 0.007 | 0.007 | 0.006 | 0.024 |
| 17 | Praguay 2 | -0.001 | 0.002 | 0.002 | 0.000 | 0.006 | 0.003 | 0.006 | 0.004 | 0.007 | 0.004 | 0.008 | 0.005 |
| 18 | Praguay 1 | 0.002 | 0.003 | 0.007 | -0.001 | 0.002 | 0.004 | 0.008 | 0.005 | 0.003 | 0.004 | 0.013 | 0.006 |
| 19 | Chuquisaca 1 | 0.010 | 0.007 | -0.002 | -0.006 | 0.010 | 0.007 | 0.007 | 0.027 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 20 | Tiguipa | 0.012 | 0.005 | 0.000 | 0.010 | 0.012 | 0.005 | 0.011 | 0.010 | 0.023 | 0.007 | 0.014 | 0.014 |
| 21 | Cantu Pampa | 0.005 | -0.001 | 0.003 | 0.002 | 0.011 | 0.009 | 0.009 | 0.004 | 0.013 | 0.012 | 0.011 | 0.005 |
| 22 | La Higuera-Huana | 0.003 | 0.003 | 0.007 | 0.002 | 0.005 | 0.004 | 0.007 | 0.002 | 0.005 | 0.004 | 0.012 | 0.003 |
| 23 | Yunchara | 0.003 | -0.019 | 0.002 | -0.004 | 0.005 | 0.020 | 0.003 | 0.004 | 0.006 | 0.041 | 0.005 | 0.005 |
| 24 | Carrizal | 0.002 | -0.001 | -0.002 | 0.004 | 0.004 | 0.003 | 0.002 | 0.006 | 0.005 | 0.004 | 0.002 | 0.009 |
| 25 | Huacata | 0.000 | -0.002 | 0.002 | -0.002 | 0.001 | 0.002 | 0.004 | 0.003 | 0.002 | 0.002 | 0.005 | 0.004 |
| 26 | Iscayachi | -0.005 | -0.002 | -0.001 | 0.014 | 0.005 | 0.004 | 0.001 | 0.015 | 0.008 | 0.005 | 0.001 | 0.031 |
| 27 | Tarija | 0.003 | 0.182 | 0.009 | -0.006 | 0.006 | 0.183 | 0.012 | 0.015 | 0.009 | 0.444 | 0.025 | 0.022 |
| 28 | Bermejo | 0.000 | 0.000 | -0.011 | -0.003 | 0.002 | 0.005 | 0.025 | 0.005 | 0.002 | 0.006 | 0.043 | 0.006 |
| 29 | Yacuiba | -0.009 | 0.002 | -0.001 | -0.003 | 0.010 | 0.005 | 0.007 | 0.004 | 0.017 | 0.007 | 0.010 | 0.005 |
| 30 | Villamontes | 0.005 | 0.002 | -0.018 | 0.015 | 0.009 | 0.004 | 0.021 | 0.022 | 0.017 | 0.004 | 0.041 | 0.041 |
| 31 | Entre Rios | 0.019 | 0.000 | -0.001 | -0.001 | 0.022 | 0.004 | 0.003 | 0.002 | 0.039 | 0.004 | 0.003 | 0.002 |
| 32 | Caraparí | 0.026 | 0.118 | 0.020 | -0.103 | 0.027 | 0.120 | 0.020 | 0.129 | 0.61 | 0.286 | 0.030 | 0.284 |
| Total Promedio | | 0.005 | 0.011 | 0.002 | -0.001 | 0.008 | 0.015 | 0.007 | 0.012 | 0.011 | 0.030 | 0.010 | 0.018 |

Tabla 2 Cuadro de resultados BIAS. MAE – RMSE datos GOES / Estación Experimental (Fuente Propia)

4.2. Geoestadística (Kriging) Desviación Estándar

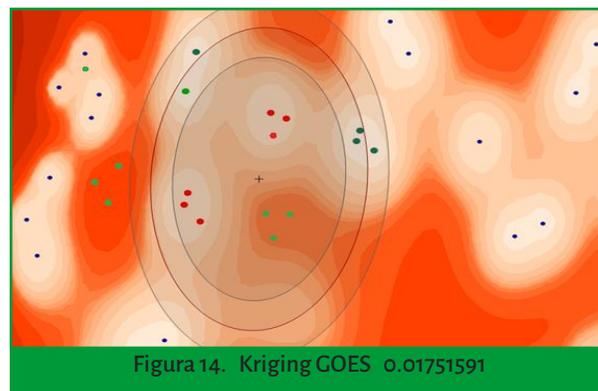
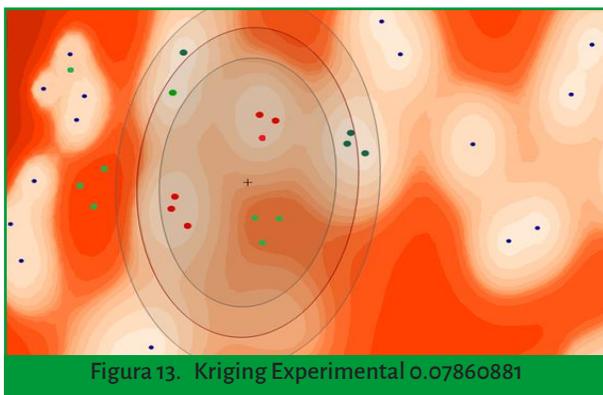
Los resultados de la comprobación realizada, se obtienen valores de (0.2585 DNI, 0.1331 GHI, 0.1264 DIF, 0.1405 GTI), lo cual se encuentra dentro del valor ($\sigma = 0,69$) que indica una mínima desviación estándar, tal como lo indica (J.Martinez-Frutos, 2014) en su libro Rev. Internacional de Diseño Optimo Robusto de modelos Interpolación Kriging 2014 pág. 101, según (Goovaerts, 2007)

| GHI GOES/EST.EXP. | | | | GHI GOES/EST.EXP. | | | |
|-------------------|-----------|---------------|-----------|-------------------|-----------|---------------|-----------|
| Count | : 32 | Skewness | : 0.7457 | Count | : 32 | Skewness | : 0.52094 |
| Min | : 1.3048 | Kurtosis | : 1.9116 | Min | : 1.4004 | Kurtosis | : 2.2372 |
| Max | : 2.1063 | 1-st Quartile | : 1.429 | Max | : 1.9164 | 1-st Quartile | : 1.5882 |
| Mean | : 1.6112 | Median | : 1.4484 | Mean | : 1.6688 | Median | : 1.5981 |
| Std. Dev. | : 0.25854 | 3-rd Quartile | : 1.8221 | Std. Dev. | : 0.13309 | 3-rd Quartile | : 1.7673 |
| GHI GOES/EST.EXP. | | | | DIF GOES/EST.EXP. | | | |
| Count | : 32 | Skewness | : 0.72875 | Count | : 32 | Skewness | : 1.0674 |
| Min | : 1.5742 | Kurtosis | : 1.8768 | Min | : 0.36 | Kurtosis | : 2.6448 |
| Max | : 1.9995 | 1-st Quartile | : 1.6379 | Max | : 0.73293 | 1-st Quartile | : 0.56271 |
| Mean | : 1.7371 | Median | : 1.647 | Mean | : 0.6269 | Median | : 0.69749 |
| Std. Dev. | : 0.1405 | 3-rd Quartile | : 1.8513 | Std. Dev. | : 0.1264 | 3-rd Quartile | : 0.72238 |

Tabla N°3 . Desviación Estándar DNI-DIF-GHI-GTI (Fuente Propia)

4.3. Transformación Logarítmica Kriging.

Los resultados de la aplicación logarítmica del Kriging, son 0.07860881 y 0.01751591, que según (S.Hara-Tokunaga, 2014) ± 0.5 , es valor admisible y muestra una confiabilidad en el logaritmo muy aceptable.



4.4. Validación Kriging Logarítmica

El resultado obtenido de los datos GOES, indica un valor de predicción de regresión de 0.851784 cercano al 1 lo cual indica 95% confiabilidad. Con respecto al valor del Error de Normalización -0.14822159 indica una normalización buena debido a que el valor no supera el 1. (J.Martinez-Frutos, 2014)

En el Error Estandarizado se obtuvo un resultado de 0.019, el cual indica que un valor próximo a 0, que nos señala una buena estimación.

En el resultado de la Raíz del Error Medio Cuadrático (RMSE). Los valores obtenidos son de 0.7443604 son valores cercanos a (1) y el valor de la Raíz del Error Medio Cuadrático Estandarizado (RMSS) es 1.621514 mayor que (1) son válidos.

Según (Caro Benito, 2015), indica, “Si son valores inferiores a uno, la variabilidad de la predicción se ha sobreestimado, si es mayor a 1, se ha subestimado la predicción.

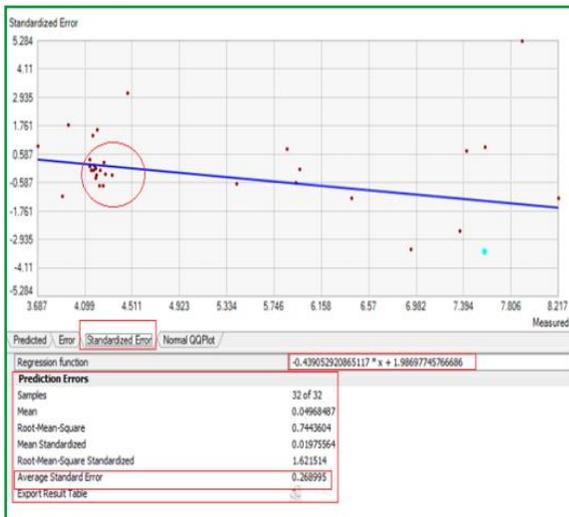


Figura 15. Cuadro del Validación en el Error de predicción y normalización Experimental (Fuente Propia)

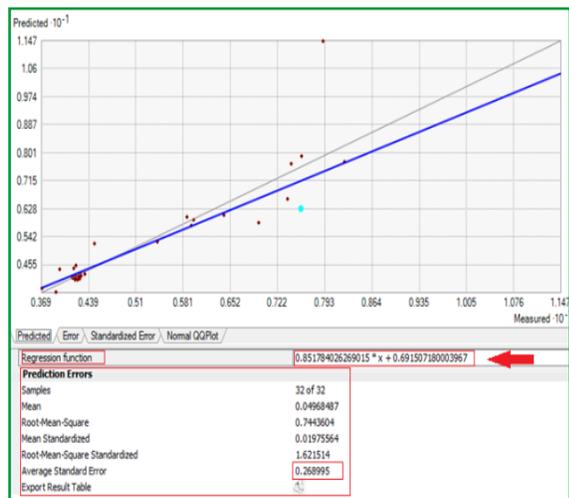


Figura 16. Cuadro del Validación en el Error de predicción y normalización - Goes (Fuente Propia)

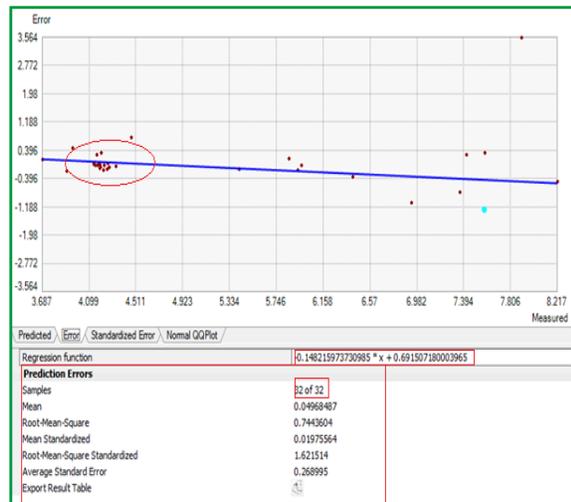


Figura 17. Cuadro del Validación en el Error Estandarizado y Error Medio Cuadrático Experimental (Fuente Propia)



Figura 18. Cuadro del Validación en el Error Estandarizado y Error Medio Cuadrático - Goes (Fuente Propia)

Los Resultados de los Modelos de Representación del Kriging Logarítmico de la interpolación de Datos Radiación Normal Directa (DNI), Radiación Global Horizontal (GHI), Radiación Difusa (DIF), Global Tilted Irradiation at Optimum Angle (GTI).

Según (Agudelo T, 2010), dice que un criterio para validar la clasificación de la dependencia espacial depende del porcentaje de error será: “si es inferior al 25 % la dependencia espacial es fuerte; entre 25-75 moderada y si es superior al 75 %, será débil. (Caro Benito, 2015)

| Parámetro de validación de la clasificación de los modelos | | | | | | | | |
|--|-------------------|---------|---------|----------|----------|---------|-------------|------|
| Variables | Est. Experimental | | GOES | | DELTAS | | Prom. Total | % |
| | Máximo | Mínimo | Máximo | Mínimo | Máximo | Mínimo | | |
| DNI | 8.46254 | 3.51887 | 8.47545 | 3.660559 | 0.01291 | 0.08672 | 0.04981 | 5.0 |
| GHI | 6.93418 | 4.01194 | 6.91046 | 4.5346 | -0.02372 | 0.52266 | 0.24947 | 24.9 |
| DIF | 2.10826 | 1.36191 | 2.08755 | 1.35104 | -0.02071 | 0.02071 | 0.01087 | 1.1 |
| GTI | 7.51699 | 4.70415 | 7.59418 | 4.72779 | 0.07719 | 0.02364 | 0.05041 | 5.0 |

Tabla 3. Datos Validación de la Clasificación de la interpolación Experimental - GOES Fuente Propia

4.5. Elaboración de los Mapas de Representación de la Radiación Normal Directa (DNI), Radiación Global Horizontal (GHI), Radiación Difusa (DIF), Radiación Global Inclinada (GTI). Para el departamento de Tarija.

Cumpliendo con el objetivo final de la investigación, mediante la aplicación del Algebra de Mapas, en el software de Arcgis 10.3, se obtuvo la distribución espacio temporal de la radiación solar para el Departamento de Tarija, obtenidos de la evaluación Geoestadística, en un rango de una grilla de 1° x 1° con base fundamental de 32 estaciones base de observación solar directa (Experimental), están clasificadas en 15 rangos de valores cuya medida es kW/m²

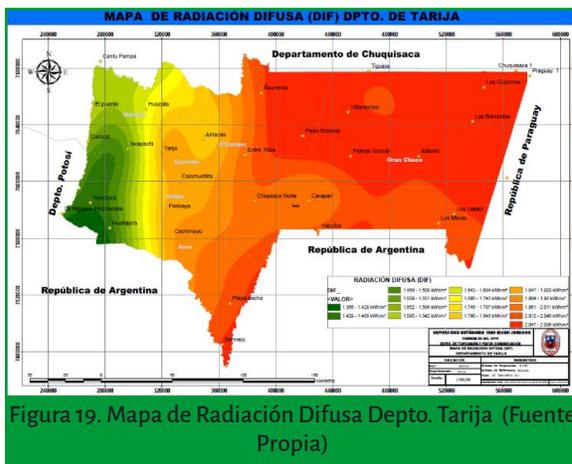


Figura 19. Mapa de Radiación Difusa Depto. Tarija (Fuente Propia)

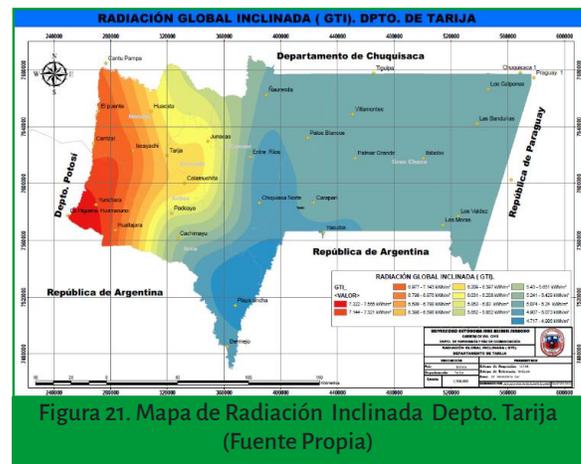


Figura 21. Mapa de Radiación Inclinada Depto. Tarija (Fuente Propia)

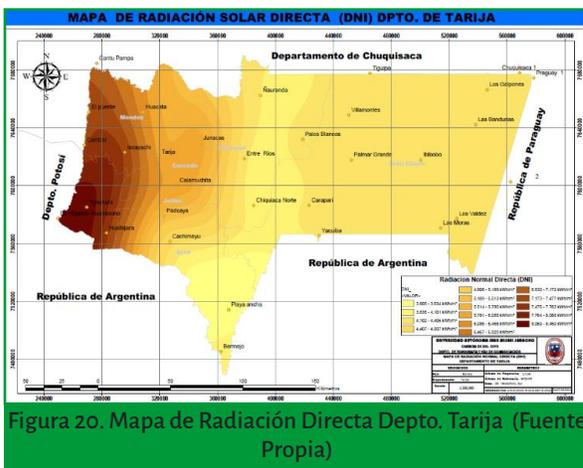


Figura 20. Mapa de Radiación Directa Depto. Tarija (Fuente Propia)

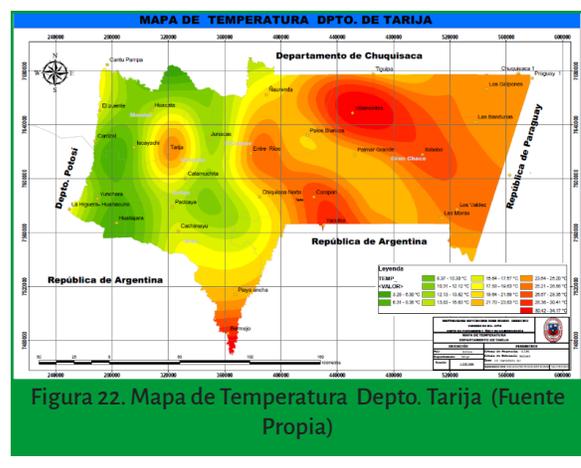


Figura 22. Mapa de Temperatura Depto. Tarija (Fuente Propia)

4.6. Validación y Discusión de Resultados respecto a los Modelos de Representación del Kriging Logarítmico.

Del procedimiento de validación y ajuste del modelo tanto de los variogramas, semivariogramas, correlaciones, los valores obtenidos con respecto al error BIAS, MAE, RMSE se encuentran en rangos muy aceptables, que por las tolerancias establecidas (Caro Benito, 2015)(pág.51), estas, se encuentra en un rango de representación de probabilidad altamente satisfactoria.

| Cuadro de Resumen de Análisis Estadístico (Errores MAE-BIAS-RSM) | | | | | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| BIAS | | | | MAE | | | | R MSE | | | |
| BIAS(DNI) | BIAS(GHI) | BIAS(DIF) | BIAS(GTI) | MAE(DNI) | MAE(GHI) | MAE(DIF) | MAE(GTI) | RMSE(DNI) | RMSE(GHI) | RMSE(DIF) | RMSE(GTI) |
| 0.005 | 0.011 | 0.002 | -0.001 | 0.008 | 0.015 | 0.007 | 0.012 | 0.012 | 0.030 | 0.010 | 0.018 |
| 0.0041 | | | | 0.0103 | | | | 0.0174 | | | |

| Cuadro de resumen de validación geoestadístico KRIGING (Errores MAE-BIAS-RSM) | | | | | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| BIAS | | | | MAE | | | | R MSE | | | |
| BIAS(DNI) | BIAS(GHI) | BIAS(DIF) | BIAS(GTI) | MAE(DNI) | MAE(GHI) | MAE(DIF) | MAE(GTI) | RMSE(DNI) | RMSE(GHI) | RMSE(DIF) | RMSE(GTI) |
| 0.005 | 0.012 | 0.004 | -0.003 | 0.015 | 0.022 | 0.008 | 0.012 | 0.010 | 0.034 | 0.011 | 0.020 |
| 0.00436 | | | | 0.01444 | | | | 0.01883 | | | |

Tabla 4 Datos de Validación Total Modelos de Representación solar Interpolados de datos Experimental-GOES (Fuente Propia)

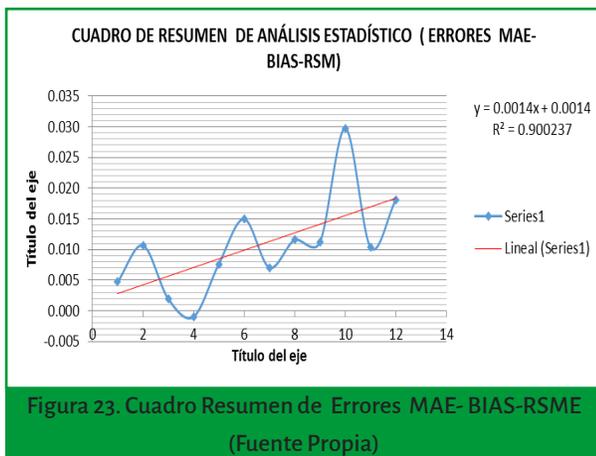


Figura 23. Cuadro Resumen de Errores MAE- BIAS-RSME (Fuente Propia)

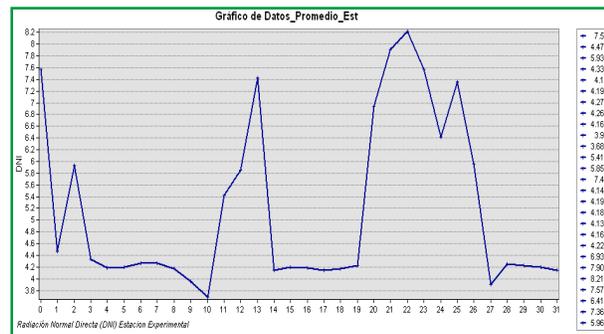


Figura 24. Perfil Datos Solares Estación Experimental (Fuente Propia)

4.7. Validación de los Modelos de Representación del Kriging Logarítmico de la interpolación datos GOES-Experimental mediante Perfiles de representación.

Los resultados de la validación del proceso logarítmico, está definido por la modelación de perfiles de los datos solares, esta validación presenta un patrón similar, donde se puede distinguir que los valores arriba mencionados en el cuadro 3.11 y 3.12 nos muestra la correspondencia del modelo ajustado, y validado, relacionando los valores ya estandarizados (Cross validation/prediction). (Goovaerts, 2007)

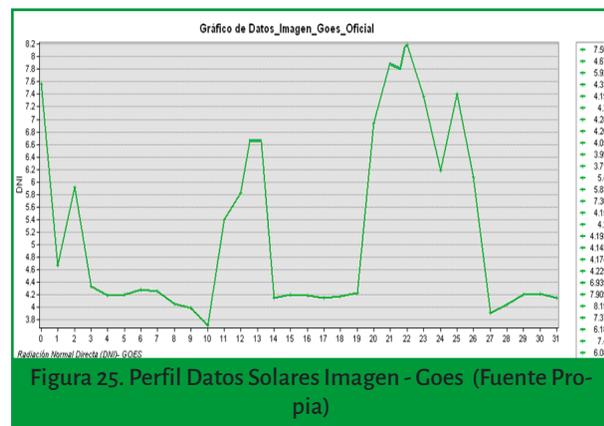


Figura 25. Perfil Datos Solares Imagen - Goes (Fuente Propia)

Las diferencias de valores son para Datos Radiación Normal Global (DNI) -0.00381 kWh/m², Radiación Global Horizontal (GHI) -0.00054 kWh/m², Radiación Difusa (DIF) 0.00000 kWh/m²

m2, Global Tilted Irradiation at Optimum Angle (GTI). 0.05355 kWh/m2, donde se puede advertir que las diferencias son mínimas tal como se puede advertir en la figura 25.

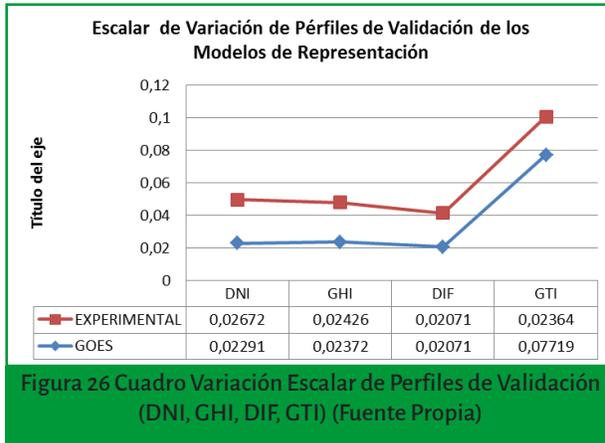


Figura 26 Cuadro Variación Escalar de Perfiles de Validación (DNI, GHI, DIF, GTI) (Fuente Propia)

5. Conclusiones

- ⊙ Las conclusiones determinadas se exponen de acuerdo al cumplimiento de los objetivos indicados, en función a la metodología presentada.
- ⊙ Para el análisis y procesamiento de las imágenes GOES, se realizó la corrección Geométrica alcanzada es de nivel 2B, cuyos valores del RMSE en la corrección son de 10 m. y ajuste de Polinomio (Affine) de primer Orden. En función de 10 puntos de Control Geodésico.
- ⊙ Los datos de las estaciones experimentales terrestres, fueron proporcionados por el proyecto de investigación científica de la UAJMS, que sirvieron de base como observaciones de comparación y validación geoestadística, aplicando los parámetros MAE, BIAS, RMSE. De fechas 11, 13, 15, 17, 20, 22 de noviembre 2019.
- ⊙ Con la aplicación de variables estadísticas, se comprueba la significancia de errores para BIAS 0.0041, MAE 0.0103 y RMSE de 0.0174, demostrando así que los datos extraídos de las imágenes GOES, tienen un error de 0.05 % con referencia a las observaciones de medidas in situ.
- ⊙ Con la aplicación de las variables Geoestadísticas en la aplicación del algoritmo Kriging, tanto para GOES y Experimental; se comprueba que la significancia de error establecido para el BIAS 0.00436, MAE 0.01444 y RMSE de 0.01883, demostrando que la significancia de error entre estas, son para el BIAS 0.00028, MAE 0.00413 y RMSE 0.00148, comprobando de que la información generada por GOES son subestimadas en la calidad de medición, ya que el grado de incertidumbre en su precisión está por 95% de aceptabilidad, porque así lo demuestra los modelos conseguidos en la interpolación y extrapolación geoestadística aplicada. (Goovaerts, 2007)
- ⊙ La evaluación solar realizada en el departamento de Tarija, nos permitió establecer el nivel espacio temporal de la mayor incidencia solar; concluyendo que la mayor incidencia solar es en zonas geográficas altas, pero de temperatura ambiente baja, por el concepto de humedad atmosférica, un factor predominante en la distorsión de la incidencia solar.

- ⊙ Con la aplicación de la técnica del álgebra de mapas en el ArcGis, las variables de radiación DNI, DIF, GHI y GTI evaluadas, nos permitió obtener modelos de representación, los mismos que están clasificados en 15 rangos para mayor representatividad de acuerdo al porcentaje de 1-25 % de dependencia de aceptabilidad según (Agudelo T, 2010). Cumpliendo de esta manera el objetivo final de la realización de una cartografía espacio temporal de la radiación solar para el departamento de Tarija.
- ⊙ Los valores establecidos en los modelos resultantes de la evaluación, representan la cantidad de radiación solar más optimas, representando así el espacio geográfico donde se la determine, aspecto prioritario y concerniente a la sociedad para futuros proyectos de inversión en la optimización de energía solar y la implementación de las mismas.

6. Referencias bibliográficas

- 🔖 Agudelo T, G. A. (2010). Dependencia Espacial: Detección, Validación Y. Medellín: Universidad EAFIT.
- 🔖 Alvarez, O. (2014). Utilización De Imágenes GOES En El Cálculo De La Radiación Solar. CEDAMAZ, 9.
- 🔖 Álvarez, Y. G. (2014). Teledetección De Aerosoles En El Noreste De Mexico. Baja California México: Instituto Tecnológico.
- 🔖 Caro Benito, A. (2015). Modelización Geoestadística Para La Predicción De Actividad Cs En Suelo. Barcelona: Unirioja.
- 🔖 Chuvieco, E. (2014). Teledetección Espacial . España: Universidad De Cataluña.
- 🔖 Cooper, P. I. (2010). The Absorption Of Radiation In Solar Stills. Barcelona España: Ariel.
- 🔖 Duffie J., B. W. (2010). Solar Engineering Of Thermal Proces. UNAM.
- 🔖 Duffie, J.A. Y Beckman W. (2010). Solar Engineering Of Thermal Proce. New York (USA):. Wiley-Interscience.
- 🔖 Escalante, A. E. (2012). GEODESIA Y FOTOGRAMETRIA PARA ING. CIVIL. TARIJA: AMERICA.
- 🔖 Goovaerts, P. (2007). Geostatistics For Natural Resources Evaluation. New York,: Oxford University Press.
- 🔖 Goswami, Y. K. (1999). Principles Of Solar Engineering. Philadelphia (USA):. Taylor & Francis.
- 🔖 IDEAM. (2005). Atlas De Radiación Solar Decolombia. Colombia: Ministerio De Ambiente Vivienda.
- 🔖 Iqbal, M. (2013). An Introduction To Solar Radiation. Toronto Canada: Academic Press.
- 🔖 J.Martinez-Frutos, P. (2014). Diseño Optimo Robusto De Modelos De Interpolación Kriging. W.D.
- 🔖 Llarráyo, A. O. (2104). Implementacion Del Método Heliosat . Pamplona España: UPNA.
- 🔖 Lucano, M. (2016). Mapa De Radiación Solar Para Cochabamba. Cochabamba Bolivia: UMSS.
- 🔖 Meteorología, A. E. (2013). Radiación Solar. España: Ministerio De Medio Ambiente Rural Y Marino.
- 🔖 Metereologia, A. E. (2013). Radiación Solar. España: Ministerio De Medio Ambiente Rural Y Marino.

- 📄 Morales, N. F. (2017). Teoría Teledetección Espacial. Perú: Geomática Ambiental SRL.
- 📄 R.Giraldo, H. (2015). Introducción A La Geoestadística Teoría Y Aplicación. Bogotá - Colombia: Facultad De Ciencias. Departamento De Estadística.
- 📄 Richards, J. A. (2005). Remote Sensing Digital Image Analysis. Canberra, Australia: The University Of New South Wales.
- 📄 Righini, R. (2004). Empleo De Imágenes Satelitales GOES 8 En El Cálculo De La Irradiación Solar Global En Distintas Zonas De Argentina. Argentina: Revista: Avances En Energías Renovables Y Medio Ambiente; Vol. 8.
- 📄 S.Hara-Tokunaga, T. (2014). Multi-Objective Robust Control With Transient Specifications. Tokio.
- 📄 Sandoval, L. V. (2017). Modelo Para Determinar La Irradiancia Solar En Diferentes Zonas Del Territorio Colombiano A Partir De Imágenes Aéreas O Satelitales.. Bogotá:: Udfjc.
- 📄 Schmit, T. (2012). GOES-R Fire And Moisture R Fire And Moisture. Australia: Satellite Studies.
- 📄 Urbanita. (2000). Introducción A La Técnica De La Fotografía Aérea. México: Satelite1.
- 📄 Páginas Web de Visita.
- 📄 Ficha Técnica De La Familia GOES. Disponible En: [Http://Www2.Elo.Utfsm.Cl/~Elo352/2002/Experiencias/Electivas/Experiencias%20Satelitales/Goes/Goes.Htm](http://Www2.Elo.Utfsm.Cl/~Elo352/2002/Experiencias/Electivas/Experiencias%20Satelitales/Goes/Goes.Htm)(Consultado febrero 2021).
- 📄 Geo Bolivia Infraestructura De Datos Espaciales Del Estado Plurinacional De Bolivia Ide-Epb Vicepresidencia Del Estado Purinacional, Www.Geo.Gob.Bo La Paz – Bolivia. (Consultado abril 2021).
- 📄 Imágenes GOES En Grads. Grilla Regular. Disponible En: [Http://Www.GOES/GOES.8.Htm](http://Www.GOES/GOES.8.Htm) (Consultado abril 2021).
- 📄 Nasa (National Aeronautics And Space Administration) Earth Observatory 2010. Measuring Aerosol Recuperado De: [Http://Earthobservatory.Nasa.Gov/Features/Aerosols/Page5.Php](http://Earthobservatory.Nasa.Gov/Features/Aerosols/Page5.Php).