



ASAGAI
ASOCIACIÓN ARGENTINA
DE GEOLOGÍA APLICADA
A LA INGENIERÍA

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente

Metodología para la delimitación de las áreas de riesgo hídrico en la Provincia de Santa Fe

Mastaglia, María Inés - Pusineri, Graciela - Arbuet, Alejandra - Pilatti, Miguel Ángel

Modelo de redes funcionales orientado a pronóstico de crecidas en cursos de llanura del Gran Rosario, Santa Fe, Argentina

Scuderi, Carlos M. - Riccardi, Gerardo A. - Zimmermann, Erik D. .

Nota Técnica. Estabilización de las subrasantes loésicas utilizando el descarte de piedras ornamentales

Cruz, María P. - Martin Schmädke, Italo F. - Arnaudo, Carlos E. - Higa, José J.

Construcción de vínculos interdisciplinarios e intersectoriales desde las ciencias sociales para el abordaje del riesgo hídrico. Ciudad de Santa Fe

Córdoba, Anabella - Chialvo, Patricia - Morresi, María del Valle

Estimación de la lluvia de diseño mediante información multi-satélite de libre disponibilidad

Catalini, Carlos G. - García, Carlos M. - García, Cesar - Jovanovic, Nebo Z. - Bugan, Richard DH

Modelo de flujo de agua subterránea en el sector industrial planificado (Tornquist, provincia de Buenos Aires)

Albouy, René - Lafont, Daniela - Lexou, Claudio - Carrica, Jorge

Cartografía de susceptibilidad hídrica en el delta del río Paraná

Sepulcri, M.G. - Flamenco, E.A. - Pizarro, M.J. - Herrera, M.G. - Borus, J. - Giordano L.

Procesos modeladores en los acantilados de Las Grutas, provincia de Río Negro

Fucks, Enrique Eduardo - Schnack, Enrique Jorge - Scalise, Armando - Abrendt, Kai - Vafeidis, Nassos - Sterr, Horst

Visión crítica por introducción de obras en márgenes y cauce del río Dulce entre las ciudades de Santiago del Estero y La Banda

Castellano, Juan - Ávila, Edgardo - Zerda, Hugo

Portada: Vista de las características geomorfológicas del valle en el que se localiza Junín de los Andes, en segundo plano volcán Lanín.

Fotografía: F.X. Pereyra

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente



**Revista de Geología
Aplicada a la Ingeniería
y al Ambiente**



ASAGAI
ASOCIACIÓN ARGENTINA
DE GEOLOGÍA APLICADA
A LA INGENIERÍA

Córdoba - Argentina

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente

Publicación Oficial de



Número 34 • 2015

ISSN 2422-5703 (En línea)

ISSN 1851-7838 (Impresa)

Maipú 645, Piso 1° - C1006ACG
Ciudad Autónoma de Buenos Aires
editor@editoresasagai.org.ar
www.editoresasagai.org.ar
www.asagai.org.ar
Tel/Fax (011)4322-2820





Estimación de la lluvia de diseño mediante información multi-satélite de libre disponibilidad

Rain design estimation from multi-satellite freely available information

Catalini, Carlos G.¹⁻² ✉ - García, Carlos M.³ - García, Cesar ¹ - Jovanovic, Nebo Z. ⁴ - Bugan, Richard DH ⁴

Recibido: 9 de febrero de 2015 • Aceptado: 7 de abril de 2015

Resumen

La amenaza hídrica se cuantifica mediante el empleo de la Creciente de Proyecto. Si ésta no se puede derivar mediante estadística de caudales o niveles históricos, se evalúa partiendo de las relaciones intensidad de lluvia-duración-Recurrencia (i-d-T). Esta metodología es más común pero necesita de extensos registros históricos de lluvias, que en general no están disponibles o son de difícil acceso. Una posible solución se puede entrever en las nuevas tecnologías satelitales que monitorean la atmósfera y sus procesos. En este trabajo se desarrolla una metodología para generar una serie histórica de lámina máxima diaria, mediante el empleo de información multisatelital de libre disponibilidad derivada por el algoritmo RFE. Se trabajó en la cuenca experimental del río Sandspruit, Sudáfrica, que cuenta con cuatro series pluviométricas de 25 años de registro en los alrededores y series más cortas (3 años) dentro de la cuenca. La técnica propuesta permitió calcular la i-d-T en la zona de estudio con una resolución de pixel de casi 1km. Los mapas de precipitación resultantes para distintas recurrencias permitirán mejorar la exactitud de los cálculos de proyectos y por consiguiente optimizar la inversión en una obra civil.

Palabras clave: *Lluvias Máximas Diarias, Sistemas de Información Geográfica, Estimación Satelital, RFE.*

Abstract

The risk for hydraulic structures is quantified by the Design Flood. In most cases when statistical or historical flow levels are not available, it can be estimated by rainfall intensity-duration-Frequency (i-d-F) relationship. This methodology is more common but requires historical records of rainfall, also a data generally unavailable or difficult to access. A possible solution may arise from the new satellite technologies that monitor the atmosphere. This paper presents a methodology to generate a time series of daily maximum rainfall using freely available satellite information derived by the RFE algorithm. The work was applied on the experimental basin of the river

1. Universidad Católica de Córdoba - Grupo de Investigación de Estudios Hidrológicos en Cuencas Pobremente Aforadas (UCC-EHCPA)

✉ ccatalini@ina.gob.ar

2. Instituto Nacional del Agua, Centro de la Región Semiárida (INA-CIRSA)

3. Centro de Estudios y Tecnología del Agua. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

4. Council for Scientific and Industrial Research (Natural Resources and the Environment) South Africa

Sandspruit, in South Africa, which has four pluviometric time series with 25 years of record around the basin and shorter series (3 years) inside the basin. The proposed technique generated the i-d-F in the study area with a pixel resolution of nearly 1km. The resulting precipitation maps for different recurrence will improve the accuracy of project's calculations and therefore optimize investment in civil works.

Keywords: *Maximum Daily Rainfall Depth, Geographical Information Systems, Satellite Rainfall Estimation, RFE*

INTRODUCCIÓN

Al dimensionar obras hidráulicas, planificar el uso del suelo y gestionar los recursos hídricos, la amenaza hídrica se cuantifica mediante el empleo de la Creciente de Proyecto. Si ésta no se puede derivar mediante estadística de caudales o niveles históricos, se evalúa partiendo de las relaciones intensidad de lluvia-duración-Recurrencia (i-d-T). Esta metodología requiere datos de lluvias máximas diarias, que deben ser extraídos de extensos registros históricos, en general no disponibles o de difícil acceso. Un problema común en los estudios hidrológicos de zonas semiáridas del mundo es la disponibilidad de datos.

Una posible solución se puede entrever en las nuevas tecnologías satelitales que monitorean la atmósfera y sus procesos. La medición de precipitación desde el espacio está basada en la interpretación de la radiación electromagnética (EM) que es dispersada o emitida por las nubes, la lluvia y la superficie planetaria, y es monitoreada por instrumentos a bordo de satélites en regiones discretas del espectro. Varios estudios se han focalizado en el uso de las porciones visibles (VIS) e infrarrojas (IR) del espectro EM (entre 10.5 - 12.5 μ m). El principal problema de las técnicas basadas en VIS/IR es que la observación solo representa las características del tope nuboso más que las de la lluvia que llega a la superficie. En cambio en frecuencias de microondas (MW), las partículas de precipitación son la principal causa de la atenuación de la radiación reflejada. Las técnicas que utilizan MW son físicamente más directas que las basadas en radiación VIS/IR.

El algoritmo RFE (Rainfall Estimation v 2.0) fue implementado a partir del 1 de enero de 2001 por el Centro de Predicciones Climáticas del NOAA. El RFE pretende mediante la utilización de múltiples satélites e instrumentos (MeteoSAT 7, SSM/I y AMSU) combinar ambas técnicas VIS/IR y MW para lograr una estimación de precipitaciones más realista.

En el presente artículo se evalúa una metodología cuyo objeto es generar una serie histórica de lámina máxima diaria, mediante el empleo de información satelital derivada por el algoritmo RFE, en una cuenca experimental del río Sandspruit, Provincia de Western Cape, Sudáfrica. Para ello, se procesaron las imágenes diarias y los resultados obtenidos fueron contrastados contra cuatro estaciones pluviométricas que poseen 25 años de registro, generando además grillas digitales georeferenciadas de distribución de lluvia máxima diaria con recurrencia asociada y series en puntos particulares de interés.

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Sandspruit se encuentra emplazada en la Provincia de Western Cape en Sudáfrica, aproximadamente a 80 km al noreste de Ciudad del Cabo, es considerada como

una cuenca de tamaño mediano, con flujo estacional durante los meses de junio y noviembre, con una superficie de aproximadamente 152 km². La cuenca experimenta un clima mediterráneo con veranos cálidos y secos e inviernos fríos y húmedos producto de eventos frontales que se aproximan desde el noroeste debido a la influencia marítima. Las precipitaciones anuales exhiben rangos que varían entre los 300 a 400 mm anuales, siendo dominados por eventos de larga duración y baja intensidad durante los meses de abril a octubre (De Clercq et al., 2010).

La topografía del área es relativamente plana, exhibiendo una superficie ondulada, con rangos de elevación comprendidos entre los 40 msnm (noroeste) a 900 msnm (sur). La pendiente media a lo largo de la cuenca es de 0,013. Siendo el uso del suelo predominantemente agrícola, al este de la cuenca se encuentra un macizo rocoso con elevaciones de más de 1700 msnm.

DATOS DISPONIBLES

Se dispone de dos tipos de fuentes de información, a saber: estaciones pluviométricas tradicionales e información satelital proveniente del satélite MeteoSAT 7 y procesadas mediante el algoritmo RFE (Rainfall Estimation v 2.0), el cual fue implementado a partir del 1 de enero de 2001 por el Centro de Predicciones Climáticas del NOAA, el mismo se encuentra disponible hasta la actualidad.

La primera fuente de información fue empleada como patrón de comparación lo que permite contrastar los resultados obtenidos mediante el empleo de la segunda fuente de información. El carácter espacial de las mismas permite generar grillas digitales georeferenciadas de distribución de lluvia máxima diaria con recurrencia asociada y series en localizaciones particulares de interés.

Pluviometría

En el área de estudio hay 7 estaciones pluviométricas tradicionales distribuidas en proximidades de la cuenca (a unos 30 km de distancia entre sí), de las cuales 4 poseen 25 años de registros.

De estas, 3 (tres) se encuentran emplazadas en su interior, presentando la menor longitud de registro, por lo cual en el presente se centra la atención en la obtención de la lámina máxima diaria con recurrencia asociada sobre estos emplazamientos.

La Tabla 1 y Figura 1, presentan la ubicación y longitud de serie de estas estaciones, los emplazamientos de estas contemplan los diferentes rangos de elevación, pudiendo catalogarlos en cuenca baja, media y alta.

Tabla 1. Estaciones pluviométricas, emplazamiento y longitud de serie.

| Nombre | Elevación [m snm] | Periodo de Serie | Longitud | Latitud |
|--------------|-------------------|------------------|----------|---------|
| De Hoek | 126 | 1986-2011 | 19,03 E | 33,15 S |
| Langgewens | 191 | 1986-2011 | 18,69 E | 33,28 S |
| Moorreesburg | 199 | 1986-2011 | 18,67 E | 33,15 S |
| Voelviei | 72 | 1986-2011 | 19,04 E | 33,34 S |
| Zwavelberg | 278 | 2009-2013 | 18,81 E | 33,35 S |
| Oranjeskraal | 118 | 2009-2013 | 18,80 E | 33,26 S |
| Sandspruit | 40 | 2009-2011 | 18,89 E | 33,16 S |

Sobre cada una de las estaciones, en base a la longitud de la serie de registros, se realizó la verificación de las hipótesis estadísticas básicas (independencia, estacionalidad y homogeneidad), para lo cual se emplearon las pruebas de Wald-Wolfowitz, Kendall y Wilcoxon. En todos los casos estas estaciones superaron dichas pruebas validando así su empleo. Además, los análisis entre este tipo de información y la proveniente de sensores remotos se realizaron sobre la misma ventana temporal, dejando un periodo de 11 años de solapamiento entre la información satelital y pluviométrica disponible.

La Tabla 2, presenta un resumen de los principales estadísticos de aquellas estaciones con mayor longitud de registro, apto para su determinación.

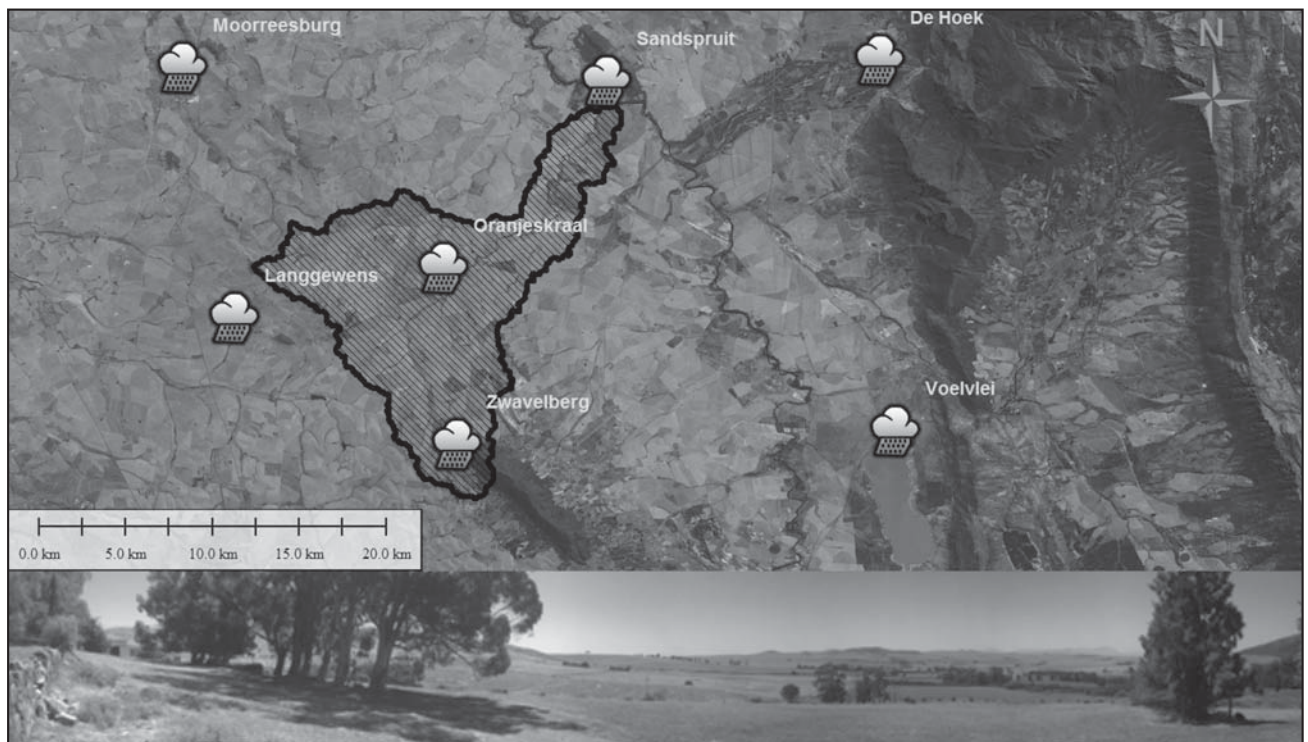


Figura 1. Emplazamiento de la Cuenca Sandspruit (superior), y vista de la cuenca desde la zona más elevada (estación Zwavelberg). Provincia de Western Cape, Sudáfrica.

Tabla 2. Estaciones pluviométricas, principales parámetros estadísticos de la serie de máximos diarios, serie completa (25 años) serie ventana temporal (11 años, 2001-2012).

| Nombre | De Hoek | | Langgewens | | Moorreesburg | | Voelviei | |
|--------------------------------|---------|-------|------------|-------|--------------|-------|----------|-------|
| Mínimo | 30,5 | 30,5 | 20,4 | 20,4 | 18,4 | 22,0 | 25,8 | 25,8 |
| Máximo | 77,5 | 77,5 | 61,2 | 61,2 | 133,0 | 133,0 | 76,2 | 76,2 |
| Promedio | 43,8 | 47,4 | 32,3 | 34,3 | 37,9 | 44,7 | 45,3 | 46,4 |
| Desviación estándar | 11,2 | 14,6 | 8,96 | 10,4 | 21,6 | 30,9 | 14,7 | 16,5 |
| Mediana | 41,1 | 42,9 | 30,9 | 31 | 33,6 | 35,2 | 39,3 | 39,3 |
| Coefficiente de variación (Cv) | 0,256 | 0,307 | 0,278 | 0,304 | 0,568 | 0,692 | 0,325 | 0,356 |
| Coefficiente de asimetría (Cs) | 1,32 | 0,821 | 1,58 | 1,76 | 3,77 | 2,68 | 0,754 | 0,587 |
| Coefficiente de curtosis (Ck) | 4,13 | 2,19 | 5,32 | 4,4 | 14,9 | 5,94 | 2,09 | 1,63 |
| Número de Observaciones | 25 | 11 | 25 | 11 | 25 | 11 | 25 | 11 |

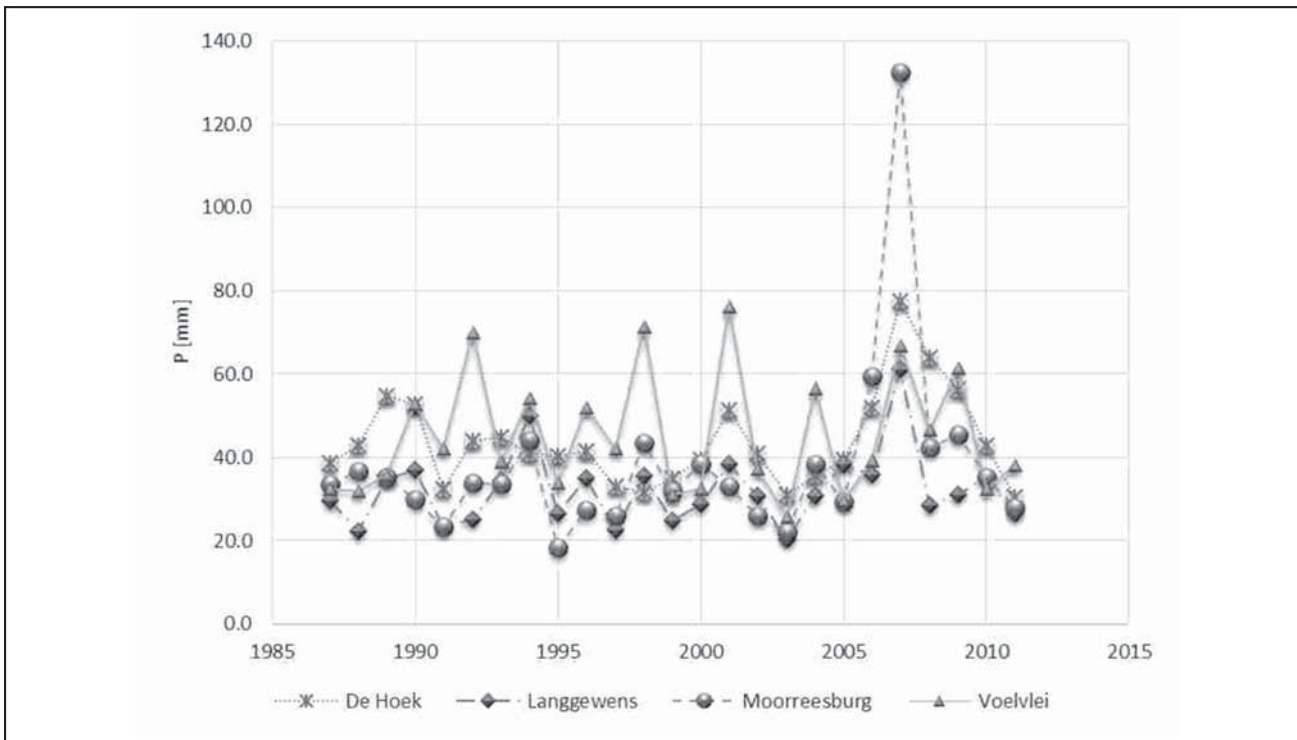


Figura 2. Precipitaciones Máximas Diarias Anuales en las estaciones de mayor longitud de registro.

Una vez realizados los análisis de estadística inferencial sobre las series de lluvias máximas diarias registradas en los puestos pluviométricos seleccionados se procedió al ajuste de la función de distribución de frecuencia, seleccionándose, dependiendo el caso, la función Lognormal o exponencial mediante el método de ajuste de la Máxima Verosimilitud. Además se evaluó

la bondad de ajuste mediante las pruebas Chi-cuadrado y Shapiro-Wilk determinándose así los valores de láminas de lluvias máximas diarias de distintos periodos de retorno y los intervalos de confianza asociados a su estimación (con una confianza del 95%).

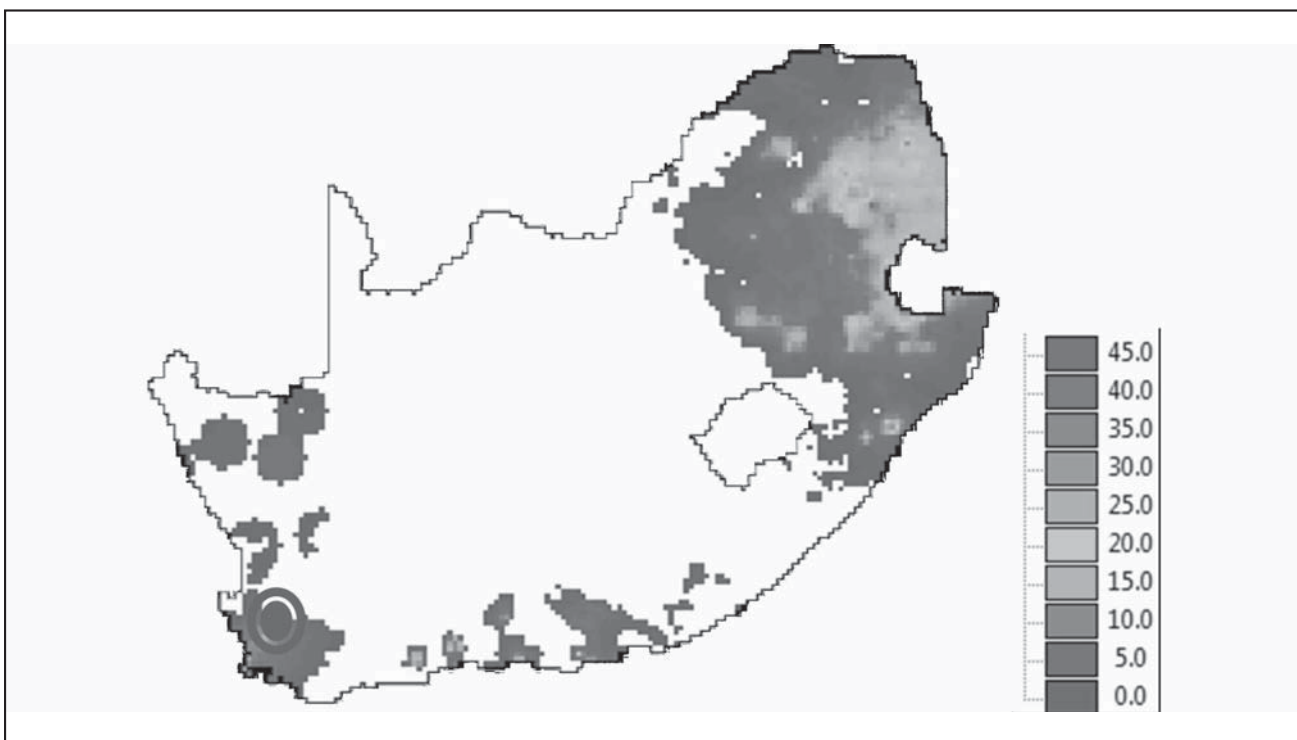


Figura 3. Precipitaciones Diaria Estimada RFE v 2.0 [mm], Sudáfrica, 30 de Octubre de 2012. (El círculo indica el área de estudio).

Información Satelital

Se contó con información satelital RFE (Rainfall Estimation v 2.0), la cual se encuentra disponible desde 2001 hasta la actualidad. Este algoritmo emplea técnicas de combinación de sensores activos y pasivos para mejorar la estimación de precipitación. Utilizando para tal fin, el satélite Geostacionario Meteosat 7, se adquieren imágenes infrarrojas cada 30 minutos y emplea áreas que presentan temperaturas de toques nubosos menores a 235°K para estimar la precipitación, además de complementar el ajuste con información terrena (proveniente de 1000 estaciones) se emplean 2 sensores de estimación de precipitación montados en otros satélites, ellos son: Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) y el Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU).

En el caso del presente artículo se desarrolló un algoritmo en el paquete computacional ILWIS, capaz de extraer la información para Sudáfrica, y particularmente para la región de interés mediante la adquisición del valor de píxeles (0,1° de resolución) sobre cada una de las 7 estaciones emplazadas en la cuenca de Sandspruit. De esta manera se calculó el valor de lámina diaria entre el 1 de enero de 2001 al 31 de diciembre de 2013 (Figura 3). Estas fueron empleadas para generar una serie histórica de máximos diarios anuales sobre las estaciones pluviométricas y con ellas realizar el análisis estadístico y ajuste de una distribución de frecuencia, el cual es contrastado con los resultados obtenidos en las 4 estaciones de longitud de serie apta para aplicar dicho análisis mediante las técnicas usuales de la hidrología.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se mencionó, una vez realizados los análisis de estadística inferencial sobre las series de lluvias máximas diarias registradas en los puestos pluviométricos seleccionados se procedió al ajuste de la función de distribución de frecuencia. Dependiendo el caso se seleccionó la función Lognormal o Exponencial mediante el método de Máxima Verosimilitud. Este ajuste se hizo tanto sobre la serie completa como sobre el periodo ventana entre las dos fuentes de información, es decir 2001-2011.

La Tabla 3 permite apreciar los resultados del ajuste de la función de distribución Lognormal, sobre los datos pluviométricos en la estación Voelvlei. Cabe mencionar que las diferencias relativas en todas las estaciones estuvieron comprendidas para una recurrencia de 100 años entre un 10 y un 25%, mientras que para recurrencias de 2 años el rango queda comprendido entre 1,4 y 14%, siempre en detrimento de la serie de menor longitud.

Una vez procesadas las RFE se cuenta con una serie de máximos diarios anuales, a la cual se puede aplicar un proceso estadístico similar al de las series pluviométricas. La Tabla 4 presenta un ejemplo del contraste de la función de distribución de probabilidades ajustada, tanto para la serie pluviométrica, periodo 2001-2011, como para la serie generada a partir de imágenes satelitales pudiéndose apreciar una tendencia general observada de una menor diferencia relativa para recurrencias esporádicas y una mayor diferencia en eventos frecuentes. Del análisis de la información surge que las informaciones RFE presentan una adecuada estimación para eventos severos; no así para eventos de mayor frecuencia, observándose diferencias de más 40 % en recurrencias de 2 años decreciendo a medida que aumenta la recurrencia. De todas maneras, es de destacar que las estimaciones RFE caen dentro del intervalo de confianza ajustado sobre datos pluviométricos, lo cual permitiría considerarlos como válidos en lugares en donde se carezca de otra fuente de información, como ser las tres estaciones de interés dentro de la cuenca del río Sandspruit, a saber: Zwavelberg, Oranjeskraal y Sandspruit.

GENERACIÓN DE MAPAS DIGITALES DE LLUVIAS MÁXIMAS DIARIAS CON DISTINTAS RECURRENCIAS ASOCIADAS

Mediante el empleo del paquete computacional IDRISI Andes[®], fue posible generar un archivo vectorial georeferenciado, el cual contiene los valores de precipitación máxima diaria y los respectivos intervalos de confianza para la función de distribución correspondiente a cada estación y recurrencias de 2, 3, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años.

Tabla 3. Estación Voelvlei, Contraste de precipitaciones máximas diarias con recurrencia asociada ajuste lognormal sobre serie completa y periodo ventana.

| T [años] | Periodo 1987-2011 | | | Periodo 2001-2011 | | | Diferencia Relativa |
|----------|-------------------|------------------------------|-------|-------------------|------------------------------|-------|---------------------|
| | P [mm] | Intervalo de confianza (95%) | | P [mm] | Intervalo de confianza (95%) | | |
| 100 | 89,0 | 67,8 | 110,0 | 99,6 | 58,2 | 141,0 | -10,6% |
| 50 | 81,8 | 63,9 | 99,6 | 90,4 | 56,1 | 125,0 | -9,5% |
| 25 | 74,4 | 59,8 | 89,0 | 81,3 | 53,5 | 109,0 | -8,5% |
| 20 | 72,0 | 58,4 | 85,6 | 78,3 | 52,6 | 104,0 | -8,0% |
| 10 | 64,3 | 53,6 | 75,0 | 68,9 | 49,1 | 88,7 | -6,7% |
| 5 | 56,1 | 48,1 | 64,1 | 59,0 | 44,5 | 73,5 | -4,9% |
| 3 | 49,3 | 43,1 | 55,6 | 51,0 | 39,9 | 62,2 | -3,3% |
| 2 | 43,2 | 37,9 | 48,4 | 43,8 | 34,7 | 53,0 | -1,4% |

Tabla 4. Estación Voelvrei, Contraste de precipitaciones máximas diarias con recurrencia asociada ajuste lognormal sobre el periodo ventana, entre información pluviométrica (terrena) y estimaciones satelitales.

| T [años] | Terrena | | | Satelital | | | Diferencia Relativa |
|----------|---------|------------------------------|-------|-----------|------------------------------|-------|---------------------|
| | P [mm] | Intervalo de confianza (95%) | | P [mm] | Intervalo de confianza (95%) | | |
| 100 | 99,6 | 58,2 | 141,0 | 82,2 | 45,3 | 119,0 | 21,2% |
| 50 | 90,4 | 56,1 | 125,0 | 73,1 | 41,8 | 104,0 | 23,7% |
| 25 | 81,3 | 53,5 | 109,0 | 64,0 | 38,3 | 89,6 | 27,0% |
| 20 | 78,3 | 52,6 | 104,0 | 61,0 | 37,1 | 84,9 | 28,4% |
| 10 | 68,9 | 49,1 | 88,7 | 51,9 | 33,6 | 70,1 | 32,8% |
| 5 | 59,0 | 44,5 | 73,5 | 42,7 | 30,1 | 55,4 | 38,2% |
| 3 | 51,0 | 39,9 | 62,2 | 36,0 | 27,4 | 44,6 | 41,7% |
| 2 | 43,8 | 34,7 | 53,0 | 30,6 | 25,2 | 36,1 | 43,1% |

En base a esta información puntual, el paquete computacional utilizado en el presente artículo permite implementar diversas metodologías para extrapolar regionalmente la información contenida en forma puntual. Así se obtuvieron mapas temáticos de tipo Raster los cuales, basan su funcionalidad en una concepción implícita de las relaciones de vecindad entre los objetos geográficos.

Su forma de proceder es dividir la zona de afección de la base de datos puntuales en una retícula o malla regular de pequeñas celdas (denominadas pixel) y atribuir un valor numérico a cada celda como representación de su valor temático.

En los fenómenos que varían continuamente, como es el caso de la lluvia, es más probable que los lugares que se encuentran más próximos entre sí, tengan valores similares en vez de que aquellos que se encuentran alejados. Esto se denomina autocorrelación espacial.

La primera tarea al usar las técnicas geoestadísticas para crear superficies es describir, de manera tan completa como sea posible, la naturaleza de la variabilidad espacial presente en los datos de muestra. Esta variabilidad espacial es determinada en términos de distancia y dirección. El análisis se realiza en pares de puntos muestrales, donde cada punto de datos es colocado en pares con cada uno de los otros puntos de datos. Cada par puede ser caracterizado por su distancia de separación (la distancia euclidiana entre los dos puntos) y su dirección de separación (el azimut en grados de la dirección de un punto al otro).

La técnica de Kriging presenta como ventaja fundamental la posibilidad de aprovechar directamente la información sobre la autocorrelación espacial existente entre los propios datos, la cual queda reflejada en el denominado variograma muestral. Además, esta técnica es capaz de representar los cambios en la dependencia espacial dentro del área de estudio. Es de destacar que con esta técnica los mapas temáticos que se obtienen presentan marcadas crestas o "células", las cuales denotan el origen puntual de la información de base.

Es por ello, que en trabajos previos (por ejemplo *Catalini et al, 2011 y 2012*) se propone una metodología de generación de superficies tendenciales, a partir de la regionalización de valores de lámina de lluvia máxima diaria para las distintas recurrencias. Debido a que la superficie resultante mediante el empleo del análisis tendencia es un modelo matemático ideal, muy suave y está libre de detalles locales (células). La técnica propuesta es de interpolación global ya que calcula una superficie que ofrece el mejor ajuste, para todo el grupo de datos conocidos. Sin embargo los datos tendenciales son un interpolador inexacto (*Catalini et al, 2010*).

La hipótesis que se emplea en este trabajo es aceptar como válidos desde el punto de vista estadístico a la superficie tendencial, que se encuentren contenidos dentro del intervalo de confianza (rango esperable de posibles valores) de la variable de interés.

Así la superficie tendencial óptima es aquella que presenta valores de lluvia máxima diaria dentro del intervalo de confianza obtenido en el análisis de estadística inferencial, lo cual validara estadísticamente su adopción. La Figura 4, permite observar el mapa que se generaría solo al emplear información puntual y externa a la cuenca de interés. Al incorporar la información satelital, el mismo cambia sustancialmente, no tanto sobre sus valores máximos sino sobre su distribución espacial, permitiendo corroborar lo observado en campo, en donde, los eventos más severos se registran en la zona de Sandspruit, influenciados por la orografía y los de menor severidad en el extremo sur de Zwavelberg

Una vez, que se han obtenido los mapas tendenciales en base a la información satelital, es posible generar curvas de frecuencia de lámina máxima diaria para las estaciones de interés que ya no solo consideran el dato puntual estimado mediante RFE, sino la información obtenida sobre otras estaciones, en el caso particular del presente estudio fue posible cuantificar las estaciones internas a la cuenca, generando así información de base para eventos severos dentro de la misma. (Figura 4)

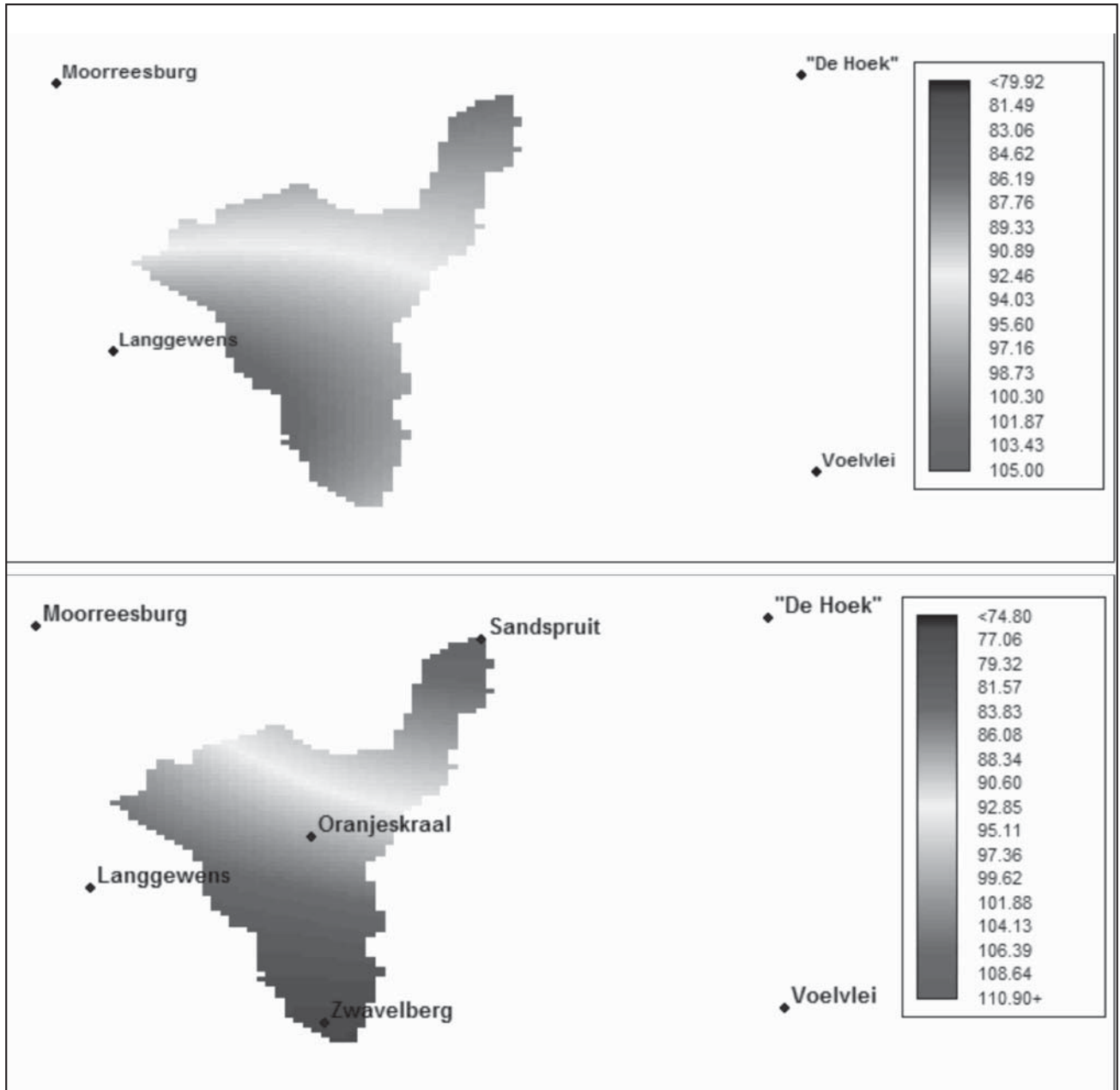


Figura 4. Superficie tendencial. Regresión Cubica. Valores de lámina de lluvia máxima diaria [mm]. Recurrencia 50 años [mm] (Superior en base a datos terrenos, inferior en base a estimaciones satelitales).

CONCLUSIONES

Sobre la Metodología Empleada

Los datos disponibles de series anuales de máximos de lluvia diaria, permiten realizar el análisis estadístico para 4 de las 7 estaciones, las cuales no se encuentran dentro de la cuenca de interés. Al poder realizarse sobre ellas la verificación de las hipótesis básicas, tanto de longitud de serie como mediante las pruebas de independencia (Wald-Wolfowitz), estacionariedad (Kendall) y homogeneidad a escala anual (Wilcoxon) donde la hipótesis de contraste H_0 se acepta a un nivel de significado del 1% o 5%, permite definir la red pluviométrica como válida para contrastar valores proveniente de estimaciones de lluvia RFE.

Tanto la función Lognormal como Exponencial, fueron las que mejor representaron el fenómeno, tanto en base a información satelital como terrena, verificándose que la incertidumbre debido al tamaño de las muestras utilizadas es más significativo que la incertidumbre debido al modelo probabilístico seleccionado. De esta manera se obtiene los valores esperados de la precipitación diaria para recurrencias de 2, 3, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años con sus correspondientes intervalos de confianza. En este trabajo se determinaron además los intervalos de confianza asociados a la estimación de lluvias máximas diarias con un intervalo de confianza del 95%. La estimación de los valores de precipitación por estación, para recurrencias preestablecidas, se traduce en una cobertura continua.

Sobre los Campos de lluvias máximas en la región de estudio

Los mapas de lluvias máximas diarias para las recurrentes analizadas, presentan una configuración semejante en cuanto a la disposición de las curvas. Se observa que las isohietas corren en general de Sur a Norte, en igual sentido creciente.

Sobre la utilidad de los resultados en ingeniería

Este trabajo provee una evaluación sobre la posibilidad de generar información en base a sensores remotos, en cuencas en donde no existan suficientes registros pluviométricos que permitan estimar los patrones de diseño de manera local, por ende es una herramienta válida y de base imprescindible para la planificación territorial y para el diseño y operación de obras de infraestructura relacionadas con los recursos hídricos, ya que para cualquier dimensionado de estructuras hidráulicas, resulta necesario cuantificar el tipo de evento hidrológico que la obra deberá soportar y el correspondiente riesgo asociado.

Utilizar estos mapas de precipitación para distintas recurrencias implica mejorar la exactitud de los cálculos y, por consiguiente, optimizar la inversión en una obra. Lamentablemente la fuente de información satelital empleada en el presente trabajo dentro de un convenio de colaboración DST con el CSIR (Council for Scientific and Industrial Research) no se encuentra aún disponible para América Latina aunque de todas maneras se está trabajando y avanzando en un algoritmo de hidroestimación en base a información satelital que permitiría evaluar estas técnicas en la región.

AGRADECIMIENTOS

A las Universidades y sus respectivos equipos de investigación que han formado y forman parte del presente proyecto de cooperación internacional financiado por el MINCYT – DTS código SA1109, al Dr. Nebo Jovanovic y Dr. Richard Bugan por el interés de trabajar en manera conjunta.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- CATALINI, C.G., MAIDAH, A., GARCÍA, C.M., CAAMAÑO NELLI, G., 2010.
Mapas digitales de isohietas de lluvias máximas diarias para la provincia de Córdoba.
I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Azul Provincia de Buenos Aires. Argentina.
- CATALINI, C.G., GARCÍA, C.M., CAAMAÑO NELLI, G.; LÉRIDA, G., SANCHEZ, E., 2011.
Implementación y validación de una técnica de regionalización de curvas i-d-T en la Provincia de Córdoba.
CÓNAGUA 2011, Tucumán, Rep. Argentina.
- CATALINI, C. G., GARCÍA, C.M., CAAMAÑO NELLI, G.E; ZIMMERMAN, E., BELLI, V., BIANCHIOTI, B., CUETO, A., LÉRIDA, G., LOVERA, D., PINASCO, G., SÁNCHEZ, E., MIGUEZ RUIZ, M., 2012.
Implementación de una técnica de regionalización de láminas máximas diarias y curvas i-d-T en las Provincias de Córdoba y Santa Fe.
III Taller sobre Regionalización de Precipitaciones Máximas. E-Book ISBN 978-950-673-953-9, pp. 267.
Editores: G. Riccardi et al. UNR Editora. Rosario, RA.
- DE CLERCQ W.P., JOVANOVIĆ, N.Z., FEY M.V., 2010.
Land use impacts on salinity in Berg River wáter.
WRC Report No. K5/1503. Water Research Commission, Pretoria. South Africa.