

Validación de modelos hidrológicos lluvia-escorrentía para su aplicación a la cabecera de cuenca del río Jequetepeque

VALIDATION OF RAIN-RUNOFF HYDROLOGICAL MODELS FOR APPLICATION TO THE HEAD OF RIVER BASIN JEQUETEPEQUE

Alejandro Alcántara*, Néstor Montalvo*, Abel Mejía*, Eusebio Ingol*

RECIBIDO: 01/02/2014 – APROBADO: 27/12/2014

RESUMEN

La validación de modelos hidrológicos es un proceso complejo de análisis y toma de decisiones. Uno de los modelos en análisis es la aplicación del modelo GR2M, lluvia escorrentía a paso mensual. El objetivo principal es determinar la eficiencia del modelo bajo la evaluación de procesos de calibración, validación y sensibilidad en la cuenca del río Jequetepeque. La finalidad es aplicar a aquellos espacios que no tienen data de caudales, donde sí se cuenta con información de precipitación y temperatura.

Para la aplicación del modelo, se utilizó el análisis de estaciones con mayor cantidad de datos de precipitación. Dicha estaciones son: Llapa, Porcón, Asunción y Contumazá. Para el caso de los caudales, se utilizó la estación Yonan, con una data de 34 años, previo análisis mediante los programas SAMS e HYDRACCESS.

Los resultados de calibración del modelo arrojan una alta eficacia con un Nash de 83%, después de la optimización de los parámetros $X1=5.88$ y $X2=0.72$. El coeficiente de determinación es altamente confiable con un valor de 0.83. En la validación del modelo, se obtuvo también una alta eficiencia de 81.3% y un coeficiente R^2 de 0.86. En la sensibilidad del modelo, se determinó que el parámetro más sensible es $X2$, por lo tanto, tiene mayor influencia en los resultados del modelo.

Los caudales simulados para las estaciones de Porcón y Asunción determinan que existe una diferencia de caudales durante el transcurso del año. En la parte norte de la cabecera de cuenca, los caudales siempre están presentes; en cambio, en la parte sur de la cabecera de cuenca, los caudales están en función de la precipitación, existiendo sequías en ausencia de lluvias.

Palabras clave: Modelo lluvia-escorrentía, cuenca, calibración, simulación.

ABSTRACT

The validation of hydrological models is a complex process of analysis and decision making. One of the models in analysis is the application of the model GR2M, rain runoff to monthly pass. The main objective is to determine the efficiency of the model in the evaluation process calibration, validation and sensitivity Jequetepeque river basin. The purpose is to apply to those spaces that have no flow data, where if you have information on precipitation and temperature.

To apply the model, the analysis of as many stations with precipitation data was used; such stations are: Llapa, Porcón, Asunción and Contumazá. For the case of flow, the Yonan station used with a data of 34. Before the model was analyze using the SAMS and Hydraccess programs.

The results of model calibration, show a high efficiency in a Nash83%, after optimization parameters and $X1= 5.88$ and $X2=0.72$. The coefficient of determination is highly reliable with a value of 0.83. In the validation of the model was also obtained a high efficiency of 81.3% and a coefficient R^2 of 0.86. The sensitivity of the model, it was determined by $X2$, the most sensitive parameter, therefore, has a greater influence on the model results.

* Universidad Nacional Agraria La Molina. Programa de Doctorado en Ingeniería de Recursos Hídricos.
Corresponding author (a_b_alcantara@hotmail.com).

The simulated flow for stations Porcón and Asuncion, determine that there is a differential flow during the year. In the northern part of the basin header flows are always present; instead, in the southern part of the head of basin, flow rates are a function of precipitation, droughts exist in the absence of rain.

Keywords: Rainfall-runoff model, basing, calibration, simulation.

I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo está vinculado con la aplicación del modelo GR2M de lluvia-escorrentía en la cuenca del río Jequetepeque, cuenca perteneciente a la vertiente del Pacífico, ubicado en la costa norte del Perú.

Los datos en análisis pertenecen a estaciones distribuidas espacialmente con la mayor cantidad de data (precipitación y temperatura) y la estación Yonan, con datos de caudales, cuyo periodo corresponde a los años 1965 – 1998.

Dada la problemática de la deficiencia de datos de caudales, lo que se espera obtener en el presente estudio es la aplicación eficiente del modelo a la cuenca del río Jequetepeque; el problema se extiende a la mayor cantidad de cuencas y microcuencas de la parte alta, lugares en los cuales se presentan como información valiosa los datos de precipitación y temperatura.

El programa SAMS ha permitido el análisis de los datos y la generación de caudales sintéticos con proyección de fenómenos de El Niño; asimismo, el programa Hydraccess ha permitido distribuir la influencia espacial de las estaciones y delimitación de influencia de la intensidad de precipitación espacial a lo largo de la cuenca.

Durante el proceso de utilización del modelo GR2M, se han realizado los procesos de calibración para un periodo de 240 meses, y el periodo de validación de 120 meses, como parte del planteamiento de los objetivos para el estudio de la cuenca del río Jequetepeque. Con la finalidad de determinar el parámetro que tiene mayor influencia en los resultados del modelo, se planteó el proceso de sensibilidad del modelo con variaciones porcentuales del 5% de incremento. Base de estos procesos, se discute los resultados que arroja el modelo mediante tablas y figuras.

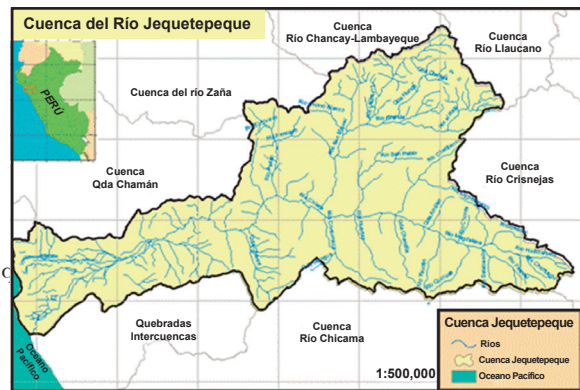
II. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

2.1. Cuenca del río Jequetepeque

El área de estudio se encuentra en la parte norte del Perú, ubicada entre las regiones de La Libertad (provincias: Pacasmayo y Chepén) y Cajamarca hacia el este (provincias de Cajamarca, Contumazá, San Pablo y San Miguel). Hidrológicamente pertenece a la vertiente del Pacífico, con una superficie aproximada de 4,443.63 km² (INADE, 2002).

El río Jequetepeque tiene una longitud de 161.50 km con un recorrido de este a oeste, cuyas aguas desembocan en el océano Pacífico; su altitud varía desde los 0 msnm hasta los 4,188 msnm; espacialmente está limitando con siete cuencas, como se ilustra en la figura 1. En la parte media de la cuenca, se ha construido el embalse Gallito Ciego, con una capacidad de almacenamiento de agua

de 573x10⁶ m³ de agua (FAO, 2003), cuyo uso principal es la generación de energía eléctrica y el desarrollo de la actividad agrícola.



Fuente: Mapa digital del Perú. Adecuado.

Figura N° 1. Ubicación espacial de la cuenca del río Jequetepeque.

2.2. Datos hidrológicos

Los datos hidrométricos en la cuenca están constituidos por el conjunto de data hidrológica distribuido en puntos estratégicos, los cuales van registrando periódicamente datos en puntos denominados estaciones.

Para Molina (1975), la hidrometría es una parte de la hidrología que mide el volumen de agua que circula por una sección de un conducto en un tiempo dado. Las medidas de la cantidad de agua que circula por la sección de una quebrada, riachuelo o río son datos registrados con la finalidad de realizar su procesamiento con fines de planificación, distribución o gestión del agua.

El proceso que se utiliza para medir los caudales de una determinada sección del río es mediante el método de los llamados aforos de corriente de agua, existiendo diversos tipos de medirlos, siendo el más empleado el medir la velocidad del agua por una sección correspondiente, como se ilustra en la Figura 2 (Díaz, A. 2010).

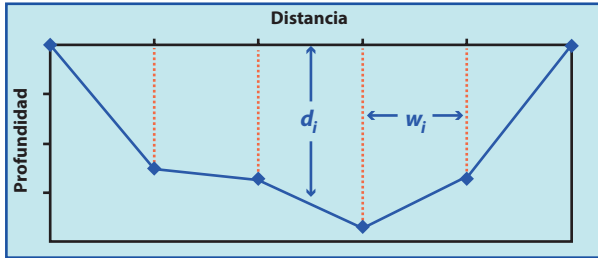
$$Q = \iint v \cdot dA$$

Donde

Q = caudal, en m³ /s.

A = área en m².

V = velocidad en m/s.



Fuente: Ministerio de Agricultura. 2007.

Figura N° 2. Medida de la sección de un río.

La aplicación del estudio de los caudales es determinante para el establecimiento de infraestructuras en la cuenca, a partir de los cuales, mediante la utilización de procesos estadísticos, nos van a permitir proyectar estas construcciones frente a posibles eventos extremos. Por lo tanto, es importante un conocimiento oportuno de caudales futuros, el cual se obtiene mediante la simulación estocástica de series hidrológicas. Este procedimiento se basa en modelos matemáticos paramétricos y no paramétricos (Chow, Maidment & Mays, 1994), por lo que es importante el uso de un determinado modelo para la solución particular de diferentes casos.

Para poder determinar eventos futuros o proyecciones respecto a la data de caudales, varios son los programas

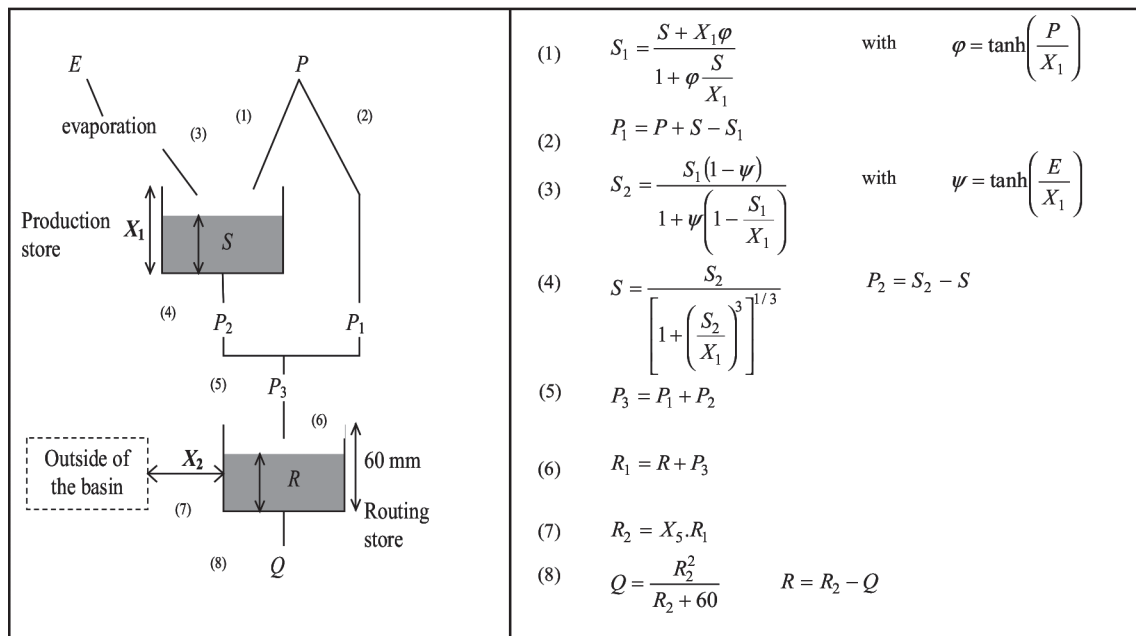
que nos ayudan. Así, por ejemplo, el modelo hidrológico SAMS (Sveinsson, O; Lee, T; Salas, J; Lane, W. & Frevert, D., 2009) es un modelo estocástico que incluye un conjunto de procedimientos de análisis de series futuras. Tal es el caso del seguimiento de diferentes capacidades:

- El análisis estocástico de datos temporales o anuales.
- La transformación de datos originales en series normales.
- Incluye series de un solo lugar o varios sitios como modelos de disgregación estocástica en modelos paramétricos y no paramétricos, entre otros.

2.3. Descripción del Programa GR2M

Es un modelo desarrollado por el Cemagref (Centro de Investigación Agrícola e Ingeniería Ambiental, Francia), que propuso un modelo global, lo más simple posible, para reconstruir los caudales a partir de la precipitación y la evapotranspiración (Mouelhi, 2003), citado por Mena Correa (2010).

El modelo GR2M funciona a paso de tiempo mensual, el cual está basado en la transformación de la lluvia en escorrentía, a través de la utilización de un conjunto de ecuaciones, según el modelo (Figura 3):



Fuente: Mouelhi. 2003.

Figura N° 3. Esquema conceptual y ecuaciones del modelo GR2M.

Todas las cantidades (entradas, salidas y variables internas) están expresadas en mm. En las ecuaciones presentadas a continuación, P y E representan la precipitación y la evaporación potencial promediadas sobre la cuenca del río Jequetepeque.

Debido a la precipitación, el almacenamiento en el tanque de producción, S , se convierte en S_1 , obtenido por medio de la siguiente expresión:

$$S_1 = \frac{S + X_1 \operatorname{Tanh}\left(\frac{P}{X_1}\right)}{1 + \frac{S}{X_1} \operatorname{Tanh}\left(\frac{P}{X_1}\right)} \quad 1.0$$

Donde X_1 representa la máxima capacidad del tanque de producción. El exceso de precipitación, P_1 , se calcula como:

$$P_1 = P + S - S_1 \quad 2.0$$

Debido a la evaporación (el cálculo de la evaporación real depende del valor de E), S_1 se convierte en S_2 :

$$S_2 = \frac{S_1 (1 - \operatorname{Tanh}\left(\frac{E}{X_1}\right))}{1 + (1 - \frac{S_1}{X_1}) \operatorname{Tanh}\left(\frac{E}{X_1}\right)} \quad 3.0$$

Posteriormente, una cantidad de agua P_2 es liberada del tanque de producción como percolación. De esta manera, S_2 toma un nuevo valor S , el cual representa el almacenamiento inicial en el siguiente mes:

$$S = \frac{S_2}{\left[1 + \left(\frac{S_2}{X_1}\right)^3\right]^{\frac{1}{3}}} \quad 4.0$$

$$P_2 = S_2 - S \quad 5.0$$

La suma de P_1 y P_2 es la cantidad de agua que entra en el tanque de tránsito:

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad 6.0$$

El nivel inicial en tanque de tránsito, R , se actualiza como:

$$R_1 = R + P_3 \quad 7.0$$

Luego se calcula el término de intercambio de agua F :

$$F = (X_5 - 1)R_1 \quad 8.0$$

Donde X_5 es un parámetro adimensional. Si X_5 es mayor que 1, F representa una ganancia de agua para la cuenca, y si es menor que 1 representa una pérdida. El nuevo nivel en el tanque de tránsito es:

$$R_2 = X_5 * R_1 \quad 9.0$$

La descarga a la salida de la cuenca de interés se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$Q = \frac{R_2^2}{R_2 + X_4} \quad 10.0$$

Donde X_4 es la máxima capacidad del tanque de tránsito y tiene un valor de 60 mm. Finalmente, el nivel en el tanque de tránsito al inicio del siguiente mes se calcula como:

$$Q = \frac{R_2^2}{R_2 + X_4} \quad 11.0$$

Los parámetros que deben ser calibrados en el modelo GR2M son X_1 y X_5 .

Los procesos físicos en la cuenca están representados por el almacenamiento de agua en el suelo (almacenamiento en el tanque de producción, S), la infiltración, la evaporación real (E), la percolación (P_2), tránsito de escorrentía (P_1 y P_2), flujo de agua subterránea (F).

Para evaluar la calidad del modelo, se puede realizar mediante una evaluación cuantitativa o cualitativa, en el caso del segundo se basa en la comparación gráfica entre los valores calculados y los valores observados. Un factor a considerar en el modelo es la función objetivo Nash, para cuantificar la eficiencia del modelo simulado respecto al modelo observado, su valor esta expresado en porcentaje, cuya ecuación es como sigue:

$$Nash = \left(1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{Obs,t} - Q_{Cal,t})^2}{\sum (Q_{Obs,t} - Q_{Cal,t})^2}\right) * 100 \quad 12.0$$

En el proceso de la utilización del modelo GR2M, se procede a la calibración, validación y sensibilidad del modelo; en el primer caso es obtener valores óptimos de los parámetros incluidos en el modelo, es decir el mejor ajuste entre los datos observados y los datos simulados por el modelo; en el segundo caso, la validación, es el proceso de verificación de la calidad de los ajustes de la etapa de calibración y, finalmente, la etapa de sensibilidad del modelo tiende a medir cuánto puede llegar a afectar a los resultados del modelo las variaciones relativamente pequeñas en los valores de los parámetros (Mena Correa, 2010).

III. METODOLOGÍA

Con la finalidad de implementar el modelo, se recopila información hidrometeorológica mensual de las variables de: precipitación, temperatura promedio y caudales de la cuenca Jequetepeque. Para la construcción de los mapas mensuales de evaporación potencial, se usa el método ecuacional de Thornthwaite, planteado en una plantilla Excel, el cual depende para este caso conocer la temperatura, introducir datos de lugar, latitud en grados decimales y el hemisferio en el cual está ubicada la cuenca.

Los datos de caudales se obtuvieron de la estación hidrológica Yonan, con datos históricos de 34 años, desde el

año 1965 al año 1998. Con la finalidad de estandarizar la data de las estaciones que no contaban con datos desde el año 1965, se realizaron proyecciones y simulaciones de precipitaciones sintéticas a través del programa SAMS.

Para el análisis de lluvia esorrentía, se analizaron los datos correspondientes a 4 estaciones también por un periodo de 34 años (1965-1998). Los datos a lo largo de la cuenca han sido trabajados previamente en el programa Hydraccess para determinar los métodos de interpolación y distribución espacial de las estaciones. Asimismo, el modelo GR2M es utilizado para la generación de caudales mensuales a partir de la lluvia y evapotranspiración (Tabla N° 1).

Tabla N° 1. Distribución de las estaciones en la cuenca Jequetepeque.

Nombre de la Estación	Tipo de estación	Provincia	Distrito	Longitud	Latitud	Altitud msnm
Llapa	Meteorológica	San Miguel	San Miguel	-78.83028	-6.999722	2900
Porcón	Meteorológica	Cajamarca	Cajamarca	-78.62666	-7.033889	3261
Asunción	Meteorológica	Cajamarca	Asunción	-78.5155	-7.3121	2194
Contumazá	Meteorológica	Contumazá	Contumazá	-78.83028	-7.355833	2610
Yonan	Hidrológica	Contumazá	Yonan	-79.10028	-7.250278	600

Fuente: SENAMHI, 2011.

Después de calibrado el modelo, se procedió a simular los caudales en el área que corresponde a dos estaciones, la estación Porcón y la estación Asunción, con la finalidad de obtener los caudales simulados con fines de cuantificación.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se observa en las Figuras 4 y 5, los datos no tienen una distribución normal, por ello vamos a transformar estos datos a una determinada función. Por el método gráfico, observamos que las probabilidades log-normal van a representar esta distribución log-normal como una línea recta, que para este caso en todos los meses acepta este parámetro.

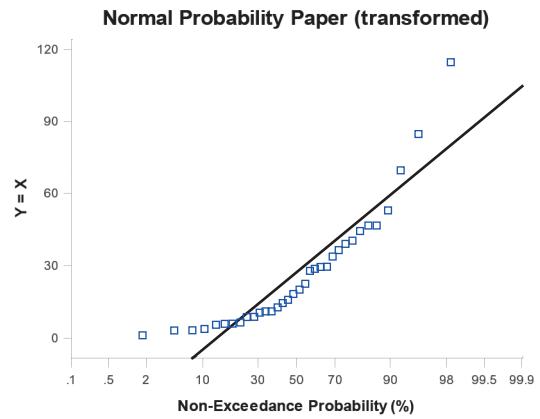
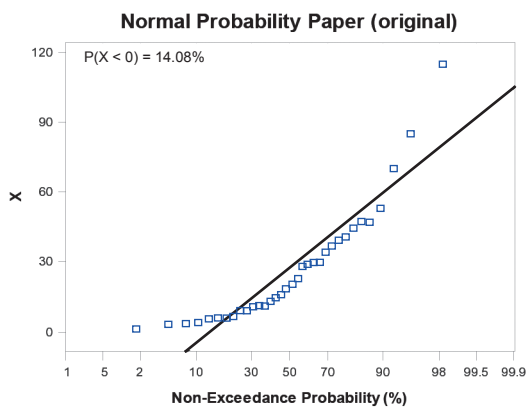


Figura N° 4. Análisis gráfico de datos con el programa SAMS.

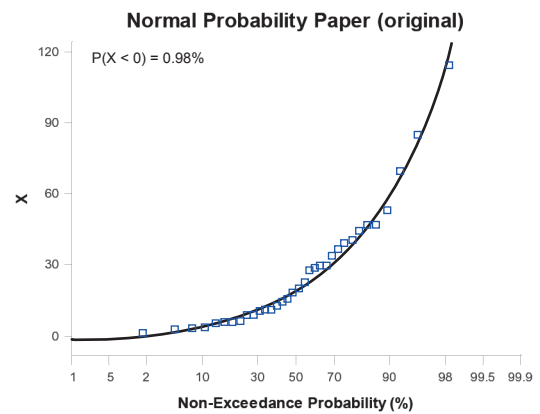
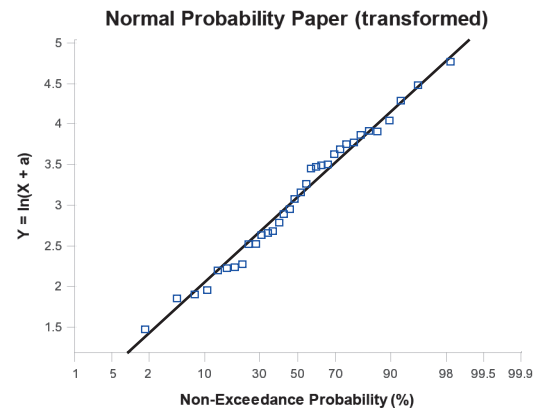


Figura N° 5. Luego de aplicar el log-normal, se ajustan los datos y se obtiene:

Las muestras estadísticas que arrojan el programa SAMS de las series originales y series transformadas de la estación en análisis se presentan en la Tabla 2.

Tabla N° 2. Resultados estadísticos del análisis de caudales en la estación Yonan.

Station Yonan								
Parámetros	Mean	StDev	CV	Skewness	Min	Max	acf(1)	acf(2)
Series originales	310.5	168.1	0.5414	1.6553	79.40	970.3	-0.0166	-0.0474
Series transformadas	5.609	0.5239	0.0934	-0.2398	4.387	6.879	0.0045	0.0045

Por otro lado, de acuerdo a los análisis de los modelos autorregresivos de media móvil, que se presentan en la Tabla 3, cuyo principio es generar el presente o futuro en función de lo que ha ocurrido en el pasado, los valores que nos arroja el programa para la estación en estudio nos muestra el valor referencial de trabajo ARMA (1,0), por ser el menor valor, dado que minimiza el error de pronóstico de la matriz de suma de errores.

Tabla N° 3. Resultados de los modelos autorregresivos.

Estación 1			
	ARMA(1,0)	ARMA(2,0)	ARMA(3,0)
Mean:	5.54386	5.54386	5.54386
Variance:	0.374783	0.374783	0.374783
AICC:	38.361	40.222	39.337
SIC:	37.501	40.474	40.537

Tabla N° 4. Resultado del análisis PARMA.

Estación 1 – análisis PARMA								
Season	PARMA(1,0)				PARMA(1,0)		PARMA(1,0)	
	Mean	Variance	AICC	SIC	AICC	SIC	AICC	SIC
1	3.09629	0.662601	24.519	23.658	26.297	26.550	27.017	28.217
2	3.64282	0.834269	20.586	19.725	22.945	23.198	25.233	26.433
3	4.0474	0.838159	16.470	15.609	18.497	18.750	17.224	18.423
4	3.82215	0.618956	7.436	6.575	9.647	9.900	7.880	9.080
5	3.13472	0.340606	0.998	0.138	2.665	2.918	4.199	5.399
6	2.28819	0.250824	-29.737	-30.597	-34.274	-34.021	-36.170	-34.970
7	1.5303	0.365754	-32.442	-33.303	-30.103	-29.850	-27.538	-26.338
8	1.15403	0.241532	-17.022	-17.883	-14.981	-14.729	-12.454	-11.254
9	0.830742	0.517606	-19.731	-20.592	-18.180	-17.928	-15.765	-14.566
10	2.03154	0.479121	25.161	24.300	27.092	27.344	29.659	30.859
11	2.52541	0.303288	17.468	16.608	15.251	15.503	17.792	18.991
12	2.45322	0.764442	20.725	19.864	18.471	18.724	20.932	22.132

Usando la base de datos en log-normal y con ARMA (1,0), para la estación en estudio, se determina la generación de series sintéticas para 100 años. Corriendo el modelo, obtenemos los siguientes datos del gráfico. El color azul corresponde a la data de series históricas y el color rojo son las series sintéticas o series generadas. Asimismo se pueden observar 4 grandes fenómenos de El Niño hasta el año 2094, siendo el más intenso en los próximos 10 años. Tabla 4 y figura 6.

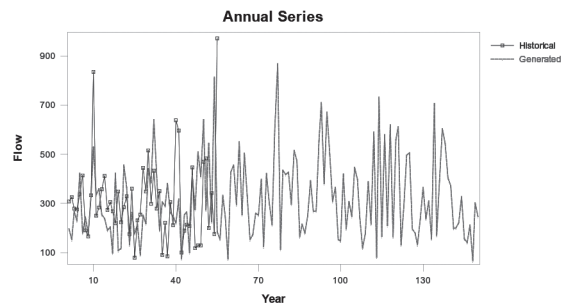


Figura N° 6. Generación de series sintéticas de la estación Yonan para 100 años.

Asimismo, en el proceso de interpolación, se ha considerado el análisis de 11 estaciones, que por los resultados del programa Hydraccess se obtiene, primero por el método de polígonos de Thiessen, la inversa del cuadrado de la distancia y Kriging, cuyos resultados gráficos se observan en la figura 7.

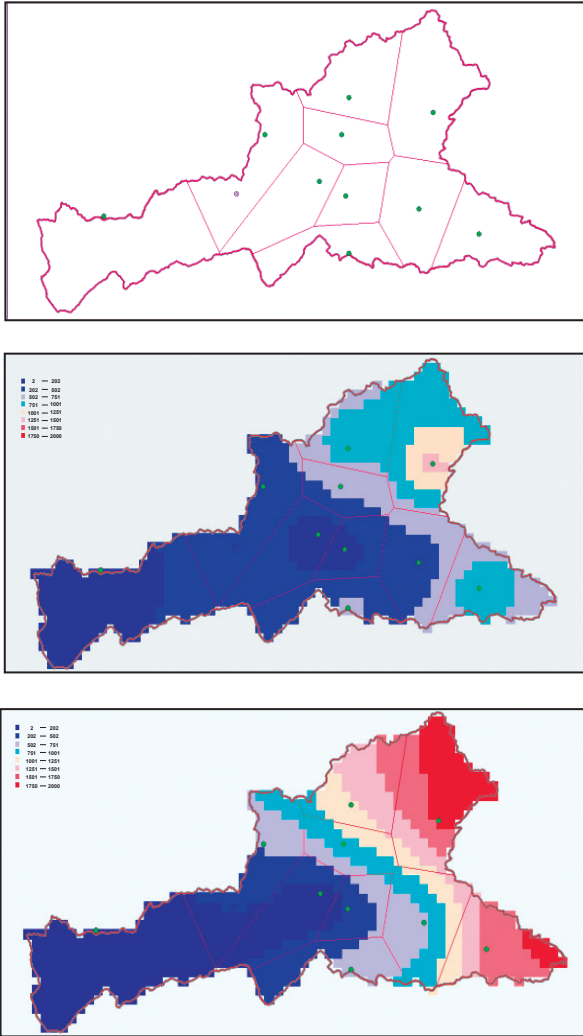


Figura N° 7. Proceso de interpolación de las estaciones en la cuenca Jequetepeque

El segundo caso (método de inversa de cuadrados) consiste en predecirnos que, en cualquier punto en la cuenca, su valor dependerá del conjunto de valores de las estaciones observadas, donde cada una de ellas tiene una influencia dependiente de la inversa de su distancia a ese punto. Gráficamente, se observa que la mayor cantidad de precipitación se encuentra al este de la cuenca, específicamente en la parte norte, la que corresponde a la estación P10, ubicada en la provincia de Cajamarca (estación Granja Porcón). Finalmente, por el método de Kriging, se observa que cada punto en evolución del espacio dentro de la cuenca está influenciado por las estaciones próximas en función de su distancia y su rumbo. De este modo se puede observar la influencia del color generando isolíneas de incremento conforme va incrementándose la altitud; esta tendencia se encuentra hacia el noreste.

4.1 Proceso de calibración del modelo

En el modelo GR2M, a paso mensual, se generan tres procesos fundamentales, los cuales se han seguido en el análisis de aplicación a la cuenca Jequetepeque: la calibración, la validación del modelo y la sensibilidad de los parámetros. Para el primer caso, en la parte de la calibración del modelo, se usó el programa Solver, incorporado dentro del programa Excel.

Los datos esenciales para nuestra cuenca abarcan 3,642 km², con un periodo de llenado de tanque de 12 meses y un periodo de calibración de 240 meses, que corresponde del año 1966 al año 1986 (Tabla 8).

En una primera instancia, con los valores sugeridos para los parámetros X1 y X2 (6 y 1, respectivamente), el Nash toma un valor muy bajo.

Tabla N° 5. Valor de los parámetros sin calibrar el modelo.

Stationname	Cuenca Jequetepeque	
Catchmentarea (km ²)		3642
Modelparameters	Transformed	Real
x1: Capacity of the production store (mm)	6.00	403.43
x2: Waterexchange coefficient (mm)	1.00	1.00
Period		
Length of the warm-up period (months)		12
Length of the test period (months)		240
Start date		01/1966
End date		01/1986
Efficiencycriteria (%)		
Nash(Q)		29.7
Nash(VQ)		44.9
Nash(ln(Q))		41.9
Bias		174.8

Los resultados que nos arroja el modelo en el proceso de calibración con la optimización del programa Solver son más aceptables, dado que el valor del Nash obtenido en este proceso tiene una eficiencia del 83% aplicado a un periodo de 240 meses, como se observa en la Tabla 6; al mismo tiempo que el valor de los parámetros se modifican (parámetros óptimos):

$$X1 = 5.88$$

$$X2 = 0.72$$

$$\text{Nash} = 83$$

Tabla N° 9. Valor de los parámetros, calibrando el modelo.

Stationname	Cuenca Jequetepeque	
Catchmentarea (km ²)		3642
Modelparameters	Transformed	Real
x1: Capacity of the production store (mm)	5.88	357.81
x2: Waterexchange coefficient (mm)	0.72	0.72
Period		
Length of the warm-up period (months)		12
Length of the test period (months)		240
Start date		01/1966
End date		01/1986
Efficiencycriteria (%)		
Nash(Q)		83.0
Nash(VQ)		83.8
Nash(ln(Q))		83.0
Bias		95.6

Asimismo, en forma gráfica (Figura 8), se observa que los flujos simulados, respecto a los observados, guarda una buena correlación, sin embargo, se observa algunos resultados no muy satisfactorios en seis periodos, siendo tres de ellos muy pronunciados: mar-78 (Qsim = 34.62 y Qobs = 7.402), abr-78 (Qsim = 39.07 y Qobs = 14.44) y ene-83 (Qsim = 92.25 y Qobs = 60.78). En el resto de los periodos, explica su proceso de generación de lluvia en caudales.

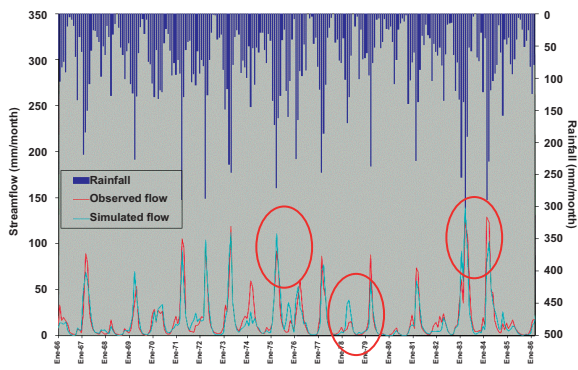


Figura N° 8. Hidrograma de lluvia, caudales observados y simulados.

En la Figura 9, se considera la distribución a partir de 1965, donde observa los cambios en la velocidad de llenado de la producción de tanques, por lo que se observa poca estabilidad en el modelo, donde las variaciones “S”, al principio del periodo en evaluación, están influenciadas generalmente por las precipitaciones (ejemplo: enero del 67, 68, 69 y 70), presentando dos periodos de tendencia marcados de los años 68 – 72 y de los años 80 al 83.

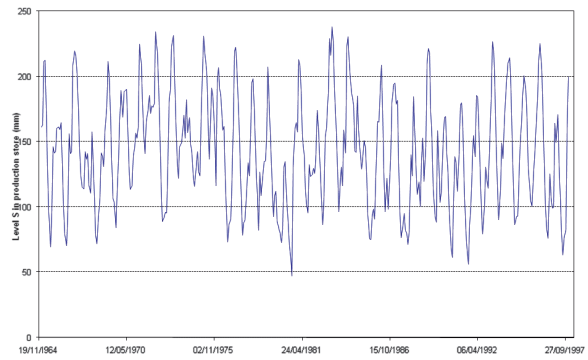


Figura N° 9. Evolución del nivel “S” del reservorio de producción.

En la figura 12, se observa el comportamiento del reservorio de transferencia, donde el nivel R presenta una alta dispersión de datos, los cuales varían entre 3 y 47 mm, registrándose el mayor valor en marzo del año 98 y el menor valor corresponde a septiembre del 80; al igual que “S”, también presenta los mismos periodos de tendencia, donde los mayores valores corresponden a las épocas de diciembre a abril, es decir, épocas de mayor precipitación.

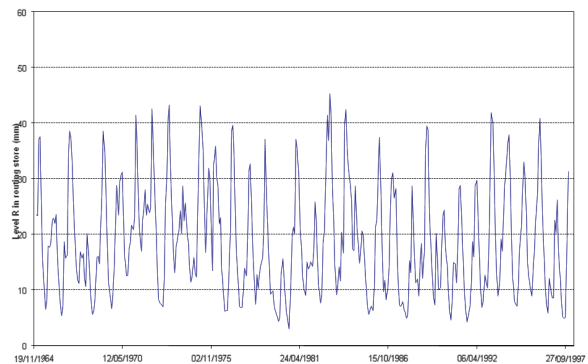


Figura N° 10. Evolución del nivel “R” del reservorio de transferencia.

Para el periodo de calibración, según la Figura 11, el coeficiente de determinación R², el cual toma un valor aceptable de 0.83, lo que explica que se cumple la relación ecuacional de Qsim = a+b*Qobs, como línea de tendencia.

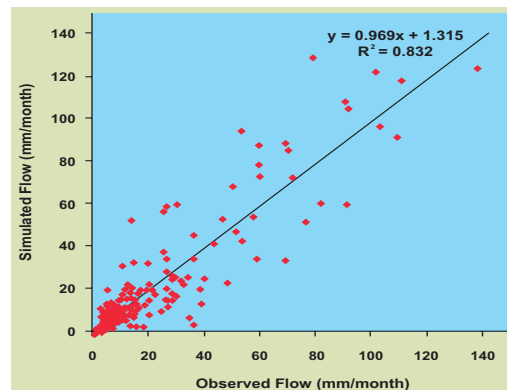


Figura N° 11. Línea de tendencia y coeficiente R².

Tabla N° 7. Periodos de calibración y validación.

2/3												1/3																			
Ene-66	Ene-67	Ene-68	Ene-69	Ene-70	Ene-71	Ene-72	Ene-73	Ene-74	Ene-75	Ene-76	Ene-77	Ene-78	Ene-79	Ene-80	Ene-81	Ene-82	Ene-83	Ene-84	Ene-85	Ene-86	Feb-86	Feb-87	Feb-88	Feb-89	Feb-90	Feb-91	Feb-92	Feb-93	Feb-94	Feb-95	Feb-96

4.2 Validación del sistema

Para la validación del modelo, usamos los parámetros determinados en la calibración, con 1/3 de la data posterior al periodo de calibración, como se muestra en el tabla 5. Esto nos va a permitir validar la utilización del modelo GR2M en la cuenca del río Jequetepeque.

Para este proceso, el periodo de validación corresponde a 120 meses, es decir, 1/3 de la data en estudio; y como se observa en la figura 14, el resultado del Nash, en este proceso, resultó con una eficiencia alta del 81.3%, manteniéndose los parámetros $X1 = 5.88$ y el $X2 = 0.72$.

Tabla N° 8. Periodo de validación.

Stationname	Cuenca Jequetepeque	
Catchmentarea (km²)		3642
Modelparameters	Transformed	Real
x1: Capacity of the production store (mm)	5.88	359.26
x2: Waterexchange coefficient (mm)	0.72	0.72
Period		
Length of the warm-up period (months)		12
Length of the test period (months)		120
Start date		02/1986
End date		02/1996
Efficiencycriteria (%)		
Nash(Q)		81.3
Nash(VQ)		80.5
Nash(ln(Q))		78.4
Bias		98.6

Asimismo, como se puede observar en la figura 15, los resultados son bastante aceptables, dado que los caudales simulados se ajustan a los caudales observados en todo este periodo. Esto es un reflejo de los periodos de la generación de lluvias, por lo cual el modelo es válido y aplicable para esta cuenca.

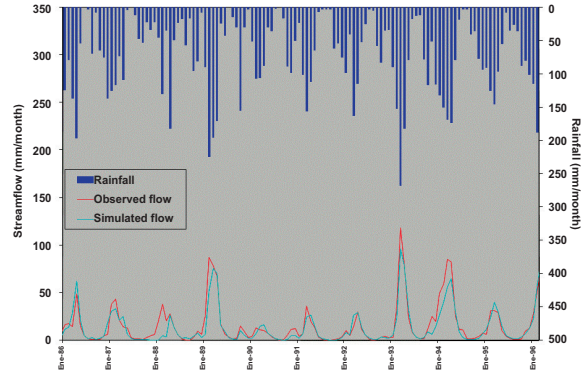


Figura N° 12. Histograma correspondiente al periodo de validación.

Los resultados estadísticos de la línea de tendencia con la ecuación lineal de los caudales simulados, en función de los valores observados, mantienen una alta correlación de 0.86, por lo que nos indica que si existe validez del modelo, como se observa en la figura 16.

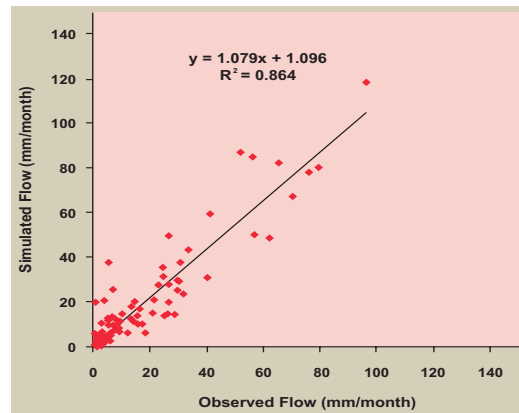


Figura N° 13. Línea de tendencia y coeficiente R², periodo de validación.

Tanto los periodos de calibración y los periodos de validación corresponden o agrupan a la mayor cantidad de

data posible de las estaciones en estudio, con la cual se está completando una mayor información de referencia de aceptación del modelo aplicativo a esta cuenca.

4.3 Sensibilidad del modelo GR2M

Con las variaciones porcentuales pequeñas en cada uno de los valores de los parámetros, los resultados que se obtienen en este proceso nos demuestran que el parámetro X2 es el más sensible (Tabla 9), por lo que es el parámetro que tiene mayor influencia en los resultados del modelo para nuestra cuenca; para ello variamos cada uno de los parámetros manteniendo el otro fijo.

Este proceso ha sido trabajado con los caudales generados durante todo el periodo de calibración del modelo. En forma gráfica, se observa en las Figuras 14, donde se grafica la sensibilidad para cada uno de los parámetros en estudio; la tendencia de uno de ellos aumenta con mayor rapidez a medida que se incrementan los porcentajes.

Tabla N° 9. Datos del proceso de sensibilidad de parámetros.

%	Qsim1	Qsim2	Qsim1%	Qsim2%
0.75	35.5	47.3	108.54	178.07
0.50	22.6	35.9	33.04	110.91
0.25	17.9	25.7	5.06	51.04
0.20	17.3	23.6	2.01	38.88
0.15	17.0	22.1	-0.16	30.05
0.10	16.8	20.2	-1.21	18.69
0.05	16.8	18.8	-1.18	10.47
0.00	17.0	17.0	0.00	0.00
-0.05	17.4	15.3	2.35	-10.13
-0.10	18.0	14.1	5.91	-17.36
-0.15	18.8	12.5	10.66	-26.55
-0.20	19.9	11.4	17.34	-33.13
-0.25	21.4	10.0	26.15	-41.45
-0.50	35.6	4.7	109.54	-72.56
-0.75	43.8	1.3	157.67	-92.65

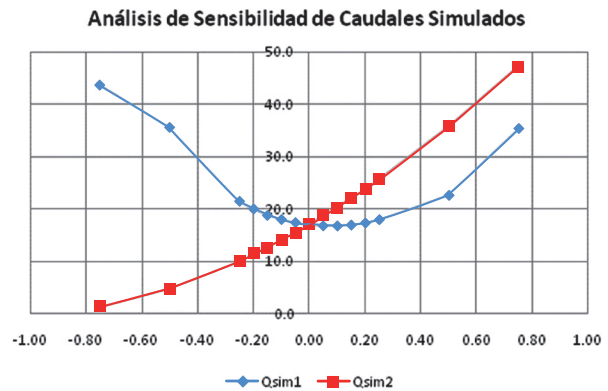


Figura N° 14. Análisis de sensibilidad del modelo.

4.4 Aplicación del modelo calibrado a las estaciones Porcón y Asunción.

La Figura 15 muestra los resultados de escorrentía para la estación Porcón, según el modelamiento del GR2M, en donde observan caudales continuos durante todas las estaciones del año. Esta caracterización es un dato importante, razón de análisis, pues no existen glaciares en esta parte de la cuenca, sin embargo, existe escorrentía aun en épocas de estiaje. El área de influencia de estos caudales son los distritos de Llapa, Cochán y Cajamarca.

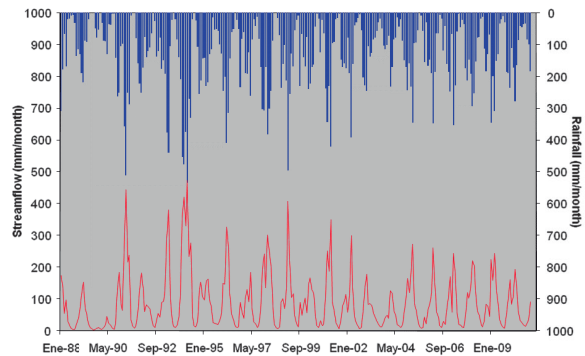


Figura N° 15. Simulación de caudales a partir de la precipitación. Est. Porcón.

En la Figura 16, observamos que los caudales simulados en las épocas secas no presentan corrientes de agua, esto estaría relacionado con las características del suelo y los procesos de intemperismo, dado que las precipitaciones también son menores respecto a la estación anterior.

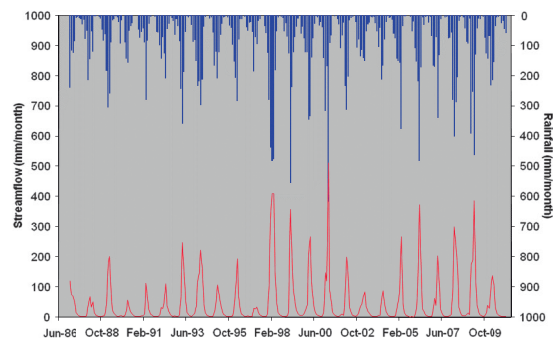
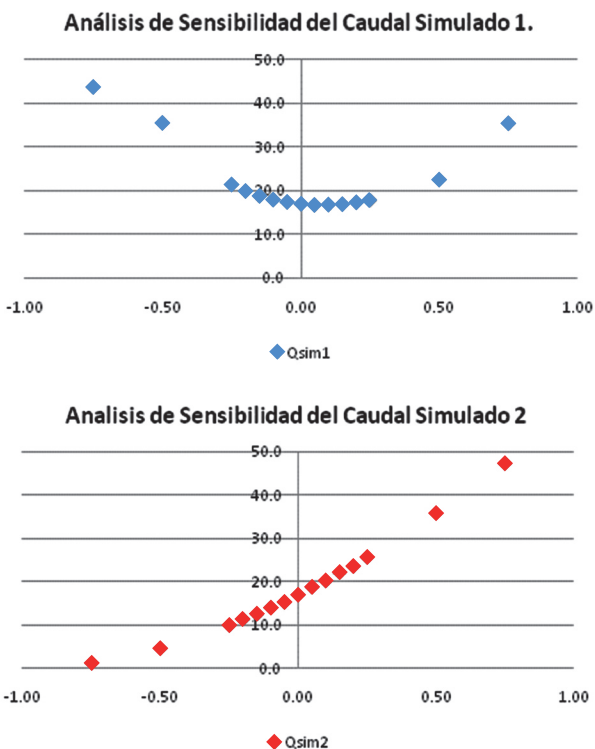


Figura N° 16. Simulación de caudales a partir de la precipitación. Est. Asunción.



La simulación de caudales de la estación Asunción corresponde para los ríos San Juan, Paigal y Quinuas, cuya área de influencia es el distrito de San Juan, Jesús, Asunción, y parte de Contumazá.

V. CONCLUSIONES

1. La aplicación del modelo GR2M en la cuenca del río Jequetepeque presenta una alta eficiencia, tanto en el periodo de calibración (83%) como en el periodo de validación del modelo (81.3%), por lo que se ajusta la aplicación de este modelo satisfactoriamente a nuestra cuenca en estudio.
2. Los parámetros de calibración adquieren valores de $X_1= 5.88$ y $X_2=0.72$. Asimismo, el análisis de sensibilidad nos muestra que el parámetro que tiene mayor influencia en los resultados del modelo es el X_2 (coeficiente de intercambio de aguas subterráneas), pues es el más sensible, frente a la variación de pequeños cambios en los parámetros del modelo.
3. La aplicación del modelo, dada su alta eficiencia para la cuenca del río Jequetepeque, se adecúa a la generación de caudales a partir de la información de precipitación, básicamente en la parte de las microcuencas (parte alta), donde se carece de información de caudales.
4. A nivel de cabecera de cuenca, se observa que existe una variación de los caudales en la parte norte de la cabecera de cuenca, respecto a una disminución en los caudales para la parte sur de la cabecera de cuenca del río Jequetepeque, simulado en dos estaciones ubicadas en las partes más altas de la cuenca en estudio.

VI. AGRADECIMIENTOS

El agradecimiento muy cordial a los docentes, quienes me orientaron en este maravilloso mundo de la investiga-

ción. Asimismo, el agradecimiento al CONCYTEC, por su apoyo a mis estudios e investigaciones sobre uno de los recursos base, como son los recursos hídricos.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. Carbajal, L.F. y Roldan, E. 2007. Calibración del modelo Lluvia-Escorrentía agregado GR4J. Aplicación: cuenca del río Aburrá. Artículo. Universidad Nacional de Colombia.
2. Chow, V.T., Maidment, D.R. y Mays, L.W. 1994. Hidrología Aplicada. Editorial Nomos. Santa Fe de Bogotá. Colombia.
3. Díaz Salas, A.M. 2010. Estadística y probabilidades en la hidrología. Asamblea Nacional de Rectores. Lima. Perú.
4. INADE. Instituto Nacional de Desarrollo. 2002. Plan de gestión de la oferta de agua en la cuenca del río Jequetepeque. Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento. Lima. Perú.
5. Mena Correa, S.P. 2010. Evolución de la dinámica de los escurrimientos en zonas de alta montaña: caso del Volcán Antisana. Tesis. Lic en Ing. Ambiental. Escuela Politécnica Nacional. Ecuador.
6. Ministerio de Agricultura. 2007. Evaluación de los recursos hídricos de la cuenca del río Ocaña, estudio hidrológico. Intendencia de recursos hídricos. Perú.
7. Molina, G. 1975. Hidrología. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima. Perú.
8. Roldan Taborda, E. 2009. Reconstrucción histórica de los caudales mensuales a lo largo de la red de drenaje de Colombia. Tesis Maestría. Universidad Nacional de Colombia.
9. Sveinsson, O., Lee, T., Salas, J., Lane, W. y Frevert, D. (2009). Stochastic Analysis Modeling and Simulation. Colorado State University. USA.