



SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA

TIEMPO, CLIMA Y AGUA

Revista Técnico Científica

"Información Hidrometeorológica para el desarrollo Socio - Económico"

**Año 1 N° 1
Octubre**

Revista Técnico-Científica

Tiempo, Clima y Agua

Ministerio de Defensa

**Servicio Nacional de
Meteorología e Hidrología
SENAMHI**

**Mayor General FAP
Gustavo Ebermann Tremolada
Jefe del SENAMHI**

**Coronel FAP
Luis Bernedo Boado
Director Técnico**

Comité de Edición

**Coronel FAP Rafael Campos Cruzado
MSc. Angel Cornejo Garrido
Ing. Alfonso García Peña
Ing. Nicéforo Ita Maguina
Ing. Marcia Valdez Rossell
Ing. Lidio Matos Caldas
Ing. Wilfredo Huarcaya Huamani
Sr. Carlos Castillo Acuña**

**Diseño y Diagramación
Sr. José Cuya Evaristo**

Revista semestral elaborada por el SENAMHI

**Jr. Cahuide 785, Lima 11, Perú
Telf. (511) 4724180. Fax. (511) 4717287
Web site: <http://www.senamhi.gob.pe>
e-mail: cdc@senamhi.gob.pe**

Indice general

Editorial

| | |
|--|----|
| Análisis Hidrometeorológico y aplicación del Modelo de Simulación IPH-MEN en la cuenca del río Pachitea | 5 |
| Fenómeno "El Niño" y su relación con las crecidas del río Ica | 14 |
| Balance Hídrico Superficial en la cuenca del río Lurín, Perú | 21 |
| Estudio de Máximas Avenidas y de Transporte de Sedimentos en el río Chancay - Huaral | 27 |
| Aplicación de un Modelo Multivariado para la Contrastación de Información Meteorológica en la Estación CP El Huarangal (Convencional vs. Automática) | 32 |
| Análisis de Confiabilidad de Pronósticos de Descarga y Volumen para la cuenca del río Rímac | 39 |
| Análisis de las Respuestas del Modelo CCM3 en el Perú a la TSM del año 2000 | 44 |
| Pronóstico de Nieblas en la Costa de Perú: Caso estudio febrero 1999 | 48 |
| Diseño y Calibración de un Modelo de Pronóstico de Cosecha en el Maíz | 55 |
| Automatización del Mapa de Clasificación Climática del Perú | 58 |
| Modelo Hidrológico para Pronóstico en el río Rímac | 61 |
| Formación de Recursos Humanos Especializados en Modelos Numéricos de Predicción de Fenómenos Atmosféricos y Oceánicos | 68 |
| Nota Técnica sobre los progresos en Predicción Numérica Hidrometeorológica en el SENAMHI | 70 |
| Subsistema de Procesamiento de Datos | 74 |

EDITORIAL

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), ingresa al siglo XXI con grandes perspectivas de desarrollo tecnológico y científico en el campo de las ciencias de la atmósfera. En su calidad de ente rector y organismo especializado en materias relacionadas con la meteorología, hidrología y el medio ambiente atmosférico fomenta la aplicación de la ciencia y la tecnología en el país. Vigila ininterrumpidamente las condiciones atmosféricas, mediante la Red Nacional de Estaciones Hidrometeorológicas distribuidas a lo largo y ancho del territorio peruano, para la toma de datos de precipitación, temperatura, viento, humedad, radiación solar, caudales de los ríos, etc; y con los que, se elabora el pronóstico del tiempo y del clima para los sectores productivos, gobiernos regionales, municipios y comunidades locales.

El SENAMHI, cumpliendo con su misión de fomentar y promover el desarrollo de la ciencia y tecnología en las áreas de la meteorología, hidrología y el medio ambiente, se ha propuesto publicar semestralmente la revista técnica y científica: "Tiempo, Clima y Agua"; con la finalidad de difundir, ante la comunidad científica involucrada con las ciencias de la atmósfera, los avances y progresos en las actividades de investigación sobre los fenómenos atmosféricos que, en ocasiones, afectan considerablemente a los sectores productivos con impactos económicos que originan grandes desequilibrios financieros y sociales.

En esta publicación se han incluido trabajos de investigación sobre diversos temas como: Aplicaciones de modelos numéricos para la evaluación de los recursos hídricos, estudio del fenómeno "El Niño", proceso de datos hidrometeorológicos, pronóstico de nieblas, clasificación climática del Perú, agrometeorología, innovación de tecnologías y transferencia de conocimientos.

Asimismo, esta revista constituye un importante aporte al desarrollo de la meteorología e hidrología en el Perú y en la región de América del Sur, cuya difusión permitirá intercambiar experiencias y conocimientos, e integrar a meteorólogos e hidrólogos que laboran en los servicios meteorológicos nacionales y otros centros de investigación vinculados con las ciencias de la atmósfera y el océano.

ANÁLISIS HIDROMETEOROLÓGICO Y APLICACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN IPH-MEN EN LA CUENCA DEL RÍO PACHITEA

Juan Julio Ordóñez Gálvez *

Dirección General de Hidrología y Recursos Hídricos, SENAMHI, Jesús María, Lima

Carlos Alberto Llerena Pinto y Esaúl Obregón Párraga

Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima

RESUMEN

El presente trabajo de investigación está contemplado dentro de los objetivos del Proyecto AARAM (Andean Amazon Rivers Analysis and Management) y ha sido desarrollado en la cuenca piloto del río Pachitea, cuya superficie total es de 29 000 km², ubicado en los departamentos de Pasco y Huánuco (Perú). Esta investigación abarca desde los análisis primarios de la información hidrometeorológica para el período seleccionado de 1965/98; hasta la determinación del comportamiento de la distribución espacial y temporal de la precipitación, temperatura y evapotranspiración, cuyos resultados son presentados en mapas de isolíneas a nivel medio, máximo y mínimo. Este análisis se complementa con las campañas de aforo y la determinación de la curva de calibración altura - gasto para la estación limnimétrica de Puerto Inca.

La segunda parte de la investigación está referida a la calibración, validación y aplicación del modelo de simulación IPH-MEN, desarrollado en el Instituto de Pesquisas Hidráulicas de la Universidad Federal de Río Grande do Sul en Brasil, por Tucci (1995). La escala temporal de aplicación del modelo es a nivel mensual y requiere información de precipitación, evapotranspiración y caudal. En la fase de calibración, se determinaron los valores de cada uno de los parámetros del modelo. Validación, es el proceso por el cual se comprueba si los valores de los parámetros del modelo determinados, representan el comportamiento real del régimen hídrico del río Pachitea. Simulación, es el proceso en el cual se generan los caudales medios mensuales para la estación de Puerto Inca, para el período 1965/98, en función de los parámetros calibrados y de los datos de precipitación y evapotranspiración.

1. INTRODUCCION

La cuenca amazónica peruana, que abarca una superficie total de 920 000 km², valor que representa el 74% del territorio nacional, presenta rica biodiversidad, que la hace fuente inagotable de recursos que requiere ser manejado bajo un desarrollo sostenible.

De esta manera el Proyecto AARAM ("Andean Amazon Rivers Analysis and Management"), orienta su objetivo a la cuenca amazónica andina, zona en la cual nacen los principales ríos cuyas aguas van a formar el Amazonas, dando origen a lo que se denomina Cuenca Amazónica Andina y que abarca a los países de Bolivia, Ecuador, Colombia, Perú y Brasil; los cuales son parte integrante del Proyecto AARAM, cuyo objetivo principal es racionalizar el manejo del agua en la región de la amazonía andina, conjuntamente con la implementación de políticas regionales de un manejo adecuado del suelo y la cobertura vegetal.

La falta de información sobre el recurso agua, obliga a los

organismos responsables del desarrollo de las diferentes regiones a recurrir a métodos de simulación que les permita estimar, con datos existentes, las disponibilidades de este recurso para así poder evaluar diferentes alternativas y seleccionar la que mejor se adapte a la región.

La simulación hidrológica es la técnica que más promete en cuanto a la aplicación de computadoras a problemas de cuencas hidrográficas, y no es más que la aplicación de un modelo a una cuenca para evaluar indirectamente su comportamiento en ciertas funciones de entrada (Duque y Barrios, 1988).

A fin de evaluar el comportamiento hídrico de las Cuencas Amazónicas Andinas, se elaboró, analizó y desarrolló el presente trabajo de investigación que permitió conocer el régimen de precipitaciones, niveles y caudales, así como también los diferentes parámetros que intervienen en el ciclo hidrológico.

Objetivo

Analizar y evaluar en forma cuantitativa y cualitativa los parámetros fisiográficos y los recursos hídricos disponibles en la cuenca del río Pachitea, así como la aplicación del modelo de simulación hidrológico IPH-MEN.

* Ing. Mecánico de Fluidos, Dirección General de Hidrología y Recursos Hídricos del SENAMHI.
e-mail: jordoñez@senamhi.gob.pe

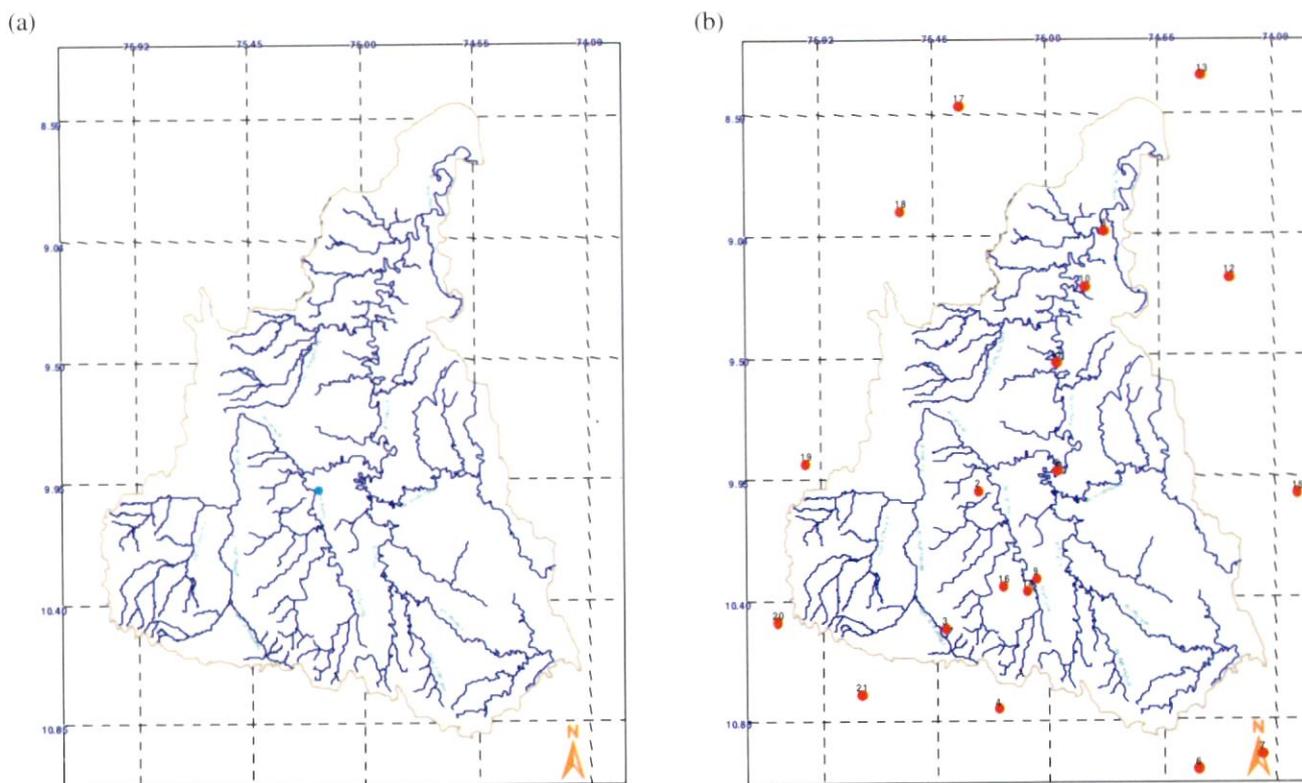


Figura 1. (a). Ubicación de la cuenca del río Pachitea. (b). Distribución de la red de estaciones hidrometeorológicas

2. REVISION BIBLIOGRAFICA

El tratamiento de la información hidrometeorológica requiere de un análisis muy detallado, por lo cual Ferrer (1992) desarrolla las metodologías más habitualmente empleadas para ello, entre las cuales tenemos las diferentes distribuciones de frecuencia tales como la de Gumbel y la SQRT. Mientras que Estrela (1992), aborda las metodologías existentes para realizar la evaluación cuantitativa de los recursos hídricos de un territorio, para la planificación hidrológica, determinando para eso en los puntos de interés la cantidad del recurso hídrico y su distribución en el tiempo.

Obregón y Tucci (1997), desarrollan un trabajo sobre Simulación con Modelo Conceptual Precipitación - Descarga para Extensiones de Series Mensuales, mediante la aplicación del modelo IPH-MEN. Este modelo de Precipitación-Descarga con intervalo de tiempo mensual, fue desarrollado en el Instituto de Pesquisas Hidráulicas de la Universidad Federal de Río Grande do Sul - Brasil por Tucci, en la versión inicial de marzo de 1994. El modelo consta de tres algoritmos principales: distribución de volúmenes, escurrimiento superficial y subterráneo y optimización de los parámetros.

El modelo fue aplicado para la simulación de las descargas medias mensuales en cinco estaciones hidrométricas de las subcuencas afluentes al lago Mirim, en el Estado de Río Grande do Sul - Brasil. En dicha región existe poca información hidrométrica y registros cortos, pero si cuenta con datos de lluvia con períodos más largos (superiores a 15 años)

lográndose encontrar precipitaciones totales mensuales en las subcuencas entre enero de 1967 y diciembre de 1995.

3. MATERIALES Y METODOS

Descripción del área de la cuenca

Para la presente investigación, se ha seleccionado la cuenca del río Pachitea, comprendida entre las coordenadas geográficas: 74° 07' a 75° 01' de longitud este y 08° 33' a 10° 48' de latitud sur; abarcando parte de los departamentos de Pasco y Huánuco (ver figura 1a).

La zona de estudio abarca una superficie total de 29 000 km² y está formada por tres grandes sistemas hidrográficos bien definidos: cuenca del río Pichis, cuenca del río Palcazu y cuenca del río Pachitea, propiamente dicho. Esta superficie es cruzada por tres grandes sistemas montañosos: las cordilleras de Yanachaga, Sira y San Carlos, separadas por el sistema montañoso de la cordillera de San Matías; estas características dan lugar a una morfología variable y compleja, lo que define un relieve fuertemente accidentado en las áreas montañosas.

Información requerida

Está referida a la recopilación de toda la información necesaria para delimitar el área de estudio, así como también los datos hidrometeorológicos que nos ayudarán a caracterizar la zona de estudio, para lo cual se utilizará la carta nacional de

Tabla 1: Relación de estaciones hidrometeorológicas - Cuenca del río Pachitea

| Número | ESTACION | TIPO | Latitud (grados) | Longitud (grados) | Altitud (msnm) | Períodos (años) |
|--------|---------------|------|------------------|-------------------|----------------|-----------------|
| 1 | MASISEA | PLU | 8,38 | 74,39 | 225 | 1965/78 |
| 2 | PUCALLPA | PLU | 6,24 | 75,48 | 195 | 1968/98 |
| 3 | Pto. INCA | PLU | 9,22 | 74,58 | 200 | 1964/96 |
| 4 | Pto. VICTORIA | PLU | 9,52 | 74,56 | 430 | 1966/80 |
| 5 | LA GRANJA | PLU | 10,43 | 75,13 | 2 068 | 1964/77 |
| 6 | IPARIA | PLU | 9,18 | 74,28 | 270 | 1966/76 |
| 7 | BOLOGNESI | PLU | 10,04 | 74,00 | 340 | 1964/79 |
| 8 | PUCALLPA | CO | 8,23 | 74,32 | 154 | 1964/94 |
| 9 | TOURNAVISTA | CO | 8,50 | 74,45 | 300 | 1965/77 |
| 10 | Pto. BERMUDEZ | CO | 10,18 | 74,54 | 300 | 1962/74 |
| 11 | SAN MIGUEL | CO | 13,01 | 73,59 | 1 050 | 1965/74 |
| 12 | POZUZO | CO | 10,03 | 75,33 | 1 000 | 1965/78 |
| 13 | PAMPA WALEY | CO | 10,54 | 75,15 | 960 | 1964/80 |
| 14 | Pto. OCOPA | CO | 11,08 | 74,15 | 395 | 1964/82 |
| 15 | SATIPO | CO | 11,14 | 74,42 | 660 | 1964/94 |
| 16 | OXAPAMPA | CO | 10,57 | 75,38 | 1800 | 1964/79 |
| 17 | MEZAPATA | CO | 10,41 | 75,23 | 1612 | 1971/97 |
| 18 | YURAC | PLU | 8,50 | 75,40 | 420 | 1965/70 |
| 19 | Pto. INCA | HLM | 9,22 | 74,58 | 200 | 1994/98 |

la zona a escala 1/100 000. Además, se recopiló información de las principales estaciones hidrometeorológicas que se encuentran instaladas en la cuenca del río Pachitea y en cuencas vecinas (ver figura 1b), las cuales son manejadas por el SENAMHI y están conformadas por 18 estaciones entre pluviométricas, climatológicas ordinarias y limnimétricas, dando una densidad mínima de una estación por cada 1 611 km² (ver tabla 1).

Metodología

Se desarrollaron los esquemas metodológicos de cada uno de los componentes que dieron forma al sistema hidrológico a desarrollar en la presente investigación.

Trabajo de campo

Se realizaron actividades con la finalidad de recopilar información hidrometeorológica existente en la zona de estudio, así como también la observación de ellos mediante la implementación de estaciones hidrométricas y campañas de aforos en forma periódica.

a. Selección de las Secciones de Aforo

Se realizó un reconocimiento integral de la cuenca del río Pachitea, con el fin de conocer su geomorfología y distribución hidrográfica, así como la selección de las estaciones de aforo

(9 estaciones). Las estaciones seleccionadas son:

- Pachitea
- Pichis
- Palcazu
- Nazarategui
- Chontabamba
- Apurucayali
- Neguachi
- Santa Cruz
- Huancabamba

b. Campañas de Aforo

El caudal de un río, es decir, la cantidad de agua que fluye a través de una sección transversal, se expresa en volumen por unidad de tiempo. Para el estudio, se ha seleccionado el correntómetro General Oceanics modelo 2030R, mecánico y digital, ecosonda modelo SEAVIEW 600, telémetro y cronómetro.

Trabajo de gabinete

Esta parte del estudio corresponde al procesamiento automático de la información recopilada, la creación de un banco de datos y el análisis de consistencia y validación. Para ello se realizaron los análisis correspondientes a las variables de precipitación, temperatura y niveles de agua.

a. Análisis de la precipitación

Los datos pluviométricos a nivel total mensual, recopilados

y automatizados, se procesaron con el fin de poder determinar su confiabilidad y consistencia, para lo cual se realizó el análisis de doble masa, mediante el cual se verifica si el período de registro de cada una de las estaciones es representativa de la zona de estudio.

Completado este análisis primario de la información de precipitación, se estimó el gradiente pluviométrico en función de las estaciones ubicadas en la superficie de estudio (nueve estaciones), mediante la aplicación de un ajuste lineal entre estos valores y la altitud correspondiente a cada estación.

b. Análisis de la Temperatura

La información seleccionada para este fin, corresponde a las estaciones climatológicas ordinarias ubicadas dentro de la cuenca del río Pachitea y las estaciones ubicadas alrededor de la zona de estudio, tal como se puede observar en el tabla 1, donde además se observa que la variación espacial de las estaciones seleccionadas y los rangos de variación altitudinal, van desde los 154 msnm hasta los 2 068 msnm; cubriendo de esta manera la superficie de estudio. Además, se estimó la variación de la temperatura en función de la altitud.

c. Análisis de la Humedad Relativa, Viento y Horas de Sol

Para estas variables, se realizaron los análisis de consistencia y estimación de sus respectivos gradientes, lo que permite conocer el comportamiento en función de la distribución espacial y temporal de dichas variables en la cuenca del río Pachitea.

d. Estimación de la Evapotranspiración

En nuestro caso, para la estimación de este parámetro se utilizó el modelo CropWat Evapotranspiration (FAO-56, 1998), desarrollado por la FAO mediante la aplicación del método de Penman-Montieth, el cual está basado en la estimación de los balances de energía y el balance aerodinámico. La ecuación utiliza registros climatológicos standard de radiación solar, temperatura, humedad de aire y velocidad de viento, a nivel diario, semanal, cada 10 días y mensual.

e. Análisis de niveles de agua

La cuenca del río Pachitea cuenta con una sola estación limnimétrica, ubicada en la localidad de Puerto Inca. Dicha estación está equipada con reglas graduadas, instaladas en forma escalonada, que permite registrar los valores de variación de los niveles de agua del río Pachitea permanentemente.

f. Estimación del caudal

De las campañas de aforos realizadas en cada una de las trece estaciones seleccionadas en la cuenca del río Pachitea, se estimó el caudal de agua mediante la aplicación del método

de la semi sección. Dichos caudales representan el comportamiento del régimen hídrico durante la época de creciente y vaciante de los ríos de la cuenca del Pachitea.

Para la estación limnimétrica de Puerto Inca, se realizó el análisis de la curva Altura - Gasto.

Modelo matemático

Seleccionamos el modelo IPH-MEN, en función del número de variables que utiliza y a la disponibilidad de información hidrometeorológica con que se cuenta para la investigación.

El modelo precipitación - descarga IPH-MEN, desarrollado en el Instituto de Pesquisas Hidráulicas de la Universidad Federal de Río Grande do Sul, Brasil por Tucci en su versión inicial de marzo de 1994, y aplicado por Obregón/Tucci (1997), desarrolla un trabajo sobre simulación con modelo conceptual precipitación - descarga para extensiones de series mensuales, mediante la aplicación del modelo IPH-MEN con intervalo de tiempo mensual.

La aplicación del modelo consta de tres procesos:

a. Calibración

En esta etapa se estiman los valores de cada una de las variables, que son:

- A, B y C = Parámetros de la ecuación de infiltración de Horton
- Ks = Coeficiente de propagación superficial
- Ksub = Tiempo de vaciar el reservorio subterráneo
- Cr = Factor de escurrimiento superficial
- α = Coeficiente de la ecuación de infiltración

seleccionándose para ello los años 1996/97 y 1997/98. Para dicho período, se creó una base de datos de precipitación, evapotranspiración y caudal a nivel medio mensual y se corrió el programa IPH-MEN con el método de optimización automática.

b. Validación

Es el proceso mediante el cual se comprueba si los valores de los parámetros del modelo, determinados en la fase de calibración, representan el comportamiento real del régimen hídrico del río Pachitea; seleccionado en 1995/96, para generar los caudales medios mensuales.

c. Simulación

Es la etapa en la cual se generan los caudales medios mensuales para la estación de Puerto Inca, para el período 1965/66 y 1994/95, en función de los parámetros calibrados y de los datos de precipitación y evapotranspiración.

Tabla 2. Precipitaciones características - Cuenca del río Pachitea

| Período | Mínimo | Medio | Máximo |
|-----------------|--------|----------|--------|
| Seco (1988/89) | 400 | 1 322,18 | 1 400 |
| Medio (1965/98) | 1 200 | 1 919,14 | 3 200 |
| Húmedo(1995/96) | 1 800 | 2 489,46 | 5 600 |

4. RESULTADOS Y DISCUSION

Resultados

Análisis de la precipitación

Los resultados obtenidos en este análisis permitieron uniformizar las series de registros de datos para cada una de las estaciones, elaborándose con ellas los mapas de isoyetas para los años característicos (ver tabla 2).

El ajuste lineal en la estimación del gradiente pluviométrico para la cuenca del río Pachitea, dio como resultado las expresiones algebraicas siguientes:

- Precipitación media (PP):
 $PP = 4,0589 \cdot H + 651,68$
 $r = 83\%$ Cuenca media y baja,
 $PP = -0,6776 \cdot H + 2 769,40$
 $r = 84\%$ Cuenca media y alta.
- Precipitación máxima (PPmax):
 $PPmax = 7,7067 \cdot H + 613,98$
 $r = 70\%$ Cuenca media y baja,
 $PPmax = -1,1405 \cdot H + 4 550,80$
 $r = 69\%$ Cuenca media y alta.
- Precipitación mínima (PPmin):
 $PPmin = 2,9839 \cdot H + 403,12$
 $r = 85\%$ Cuenca media y baja,
 $PPmin = -0,3409 \cdot H + 1 582,30$
 $r = 46\%$ Cuenca media y alta.

Donde : H = altura.

Dichas expresiones han permitido conocer que el régimen de precipitaciones medias, mínimas y máximas en la cuenca del río Pachitea, aumenta con la altitud hasta llegar a la cuenca media con valores de 4,5 mm/m, 3,26 mm/m y 9,03 mm/m, respectivamente.

Para la zona comprendida entre la cuenca media hasta la parte alta, el régimen de precipitaciones medias, mínimas y máximas, disminuye con la altitud en proporción de 0,85 mm/m, 0,41 mm/m y 1,62 mm/m, respectivamente.

Análisis de la Temperatura

Las temperaturas medias, mínimas y máximas mensuales en la cuenca del río Pachitea registran un comportamiento variable en su distribución espacial.

Los análisis desarrollados en la estimación del gradiente térmico, han permitido conocer que el régimen de temperaturas medias, mínimas y máximas en la cuenca del río Pachitea, presenta una tendencia decreciente con la altitud, que en promedio alcanza un valor de 0,01 °C/m.

- Temperatura media anual (T):
 $T = -0,0057 \cdot H + 28,11$
 $r = 95\%$
- Temperatura mínima anual (Tmin):
 $Tmin = -0,0061 \cdot H + 22,79$
 $r = 76\%$
- Temperatura máxima anual (Tmax):
 $Tmax = -0,0056 \cdot H + 33,69$
 $r = 71\%$

Análisis de la Humedad Relativa, Viento y Horas de Sol

Humedad Relativa (Hr)

La humedad relativa media mensual, registra un comportamiento variable con valores que fluctúan entre 74% y 95%.

La estimación del gradiente de la humedad relativa, a nivel medio, máximo y mínimo, ha permitido generar expresiones algebraicas, que se muestran aquí:

- Hr media anual (Hr):
 $Hr = 2,7032 \cdot \ln(H) + 65,757$
 $r = 96\%$
- Hr mínima anual (Hrmin):
 $Hrmin = 3,2163 \cdot \ln(H) + 56,242$
 $r = 85\%$
- Hr máxima anual (Hrmax):
 $Hrmax = 1,6282 \cdot \ln(H) + 78,47$
 $r = 49\%$

y que representan el comportamiento de dicha variable con la altitud. Dicho análisis ha permitido conocer que este parámetro registra un comportamiento logarítmico en su distribución espacial y mantiene una tendencia creciente.

Viento y Horas de Sol

La estimación del gradiente, para las variables de velocidad de viento y horas de sol, ha permitido obtener expresiones algebraicas que expresan el comportamiento de dichas

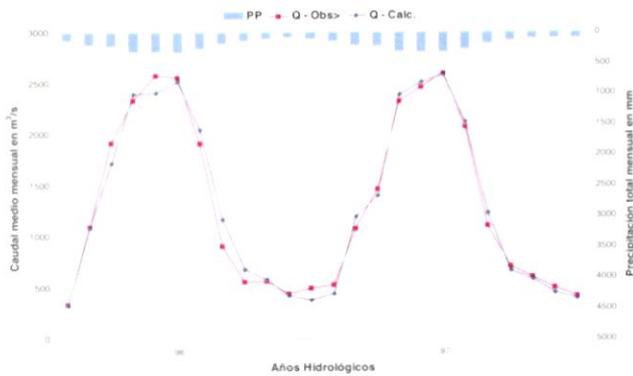


Figura 2. Calibración del modelo IPH-MEN - 1996/98
Estación: Puerto Inca - Río Pachitea

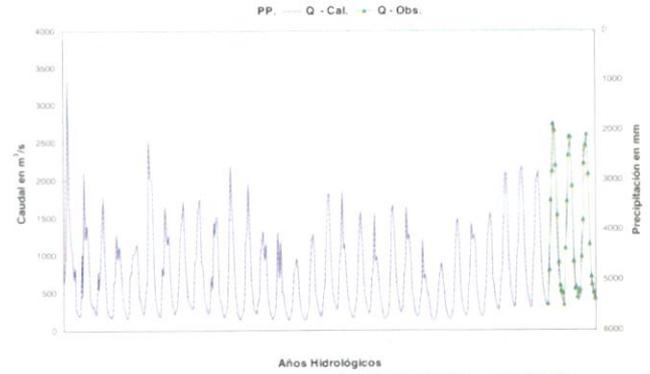


Figura 4. Simulación del modelo IPH-MEN - 1965/98
Estación: Puerto Inca - Río Pachitea

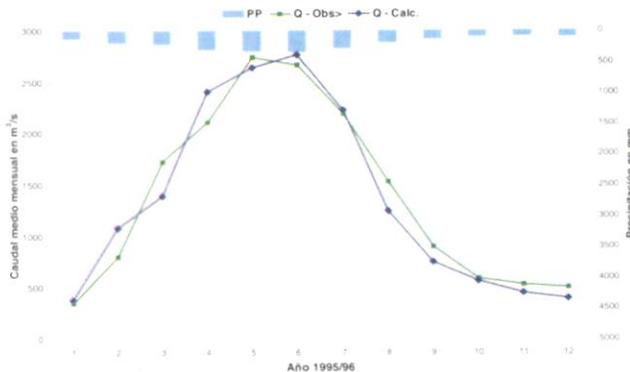


Figura 3. Validación del modelo IPH-MEN - 1995/96
Estación: Puerto Inca - Río Pachitea

variables con la altitud y cuyos resultados se presentan para los meses más representativos: enero, junio y diciembre:

- Enero:
 - Velocidad de viento:
 $V_e = 0,0525 \cdot \ln(H) + 0,4633$
 $r = 0,03\%$
 - Horas de sol:
 $H_s = 3,407 \cdot \ln(H) + 9,384$
 $r = 0,68\%$
- Junio:
 - Velocidad de viento:
 $V_e = 0,2228 \cdot \ln(H) - 0,7$
 $r = 0,70\%$
 - Horas de sol:
 $H_s = 8,2378 \cdot \ln(H) + 1,0116$
 $r = 0,92\%$
- Diciembre:
 - Velocidad de viento:
 $V_e = -0,1286 \cdot \ln(H) + 1,7163$
 $r = 0,18\%$
 - Horas de sol:
 $H_s = -2,1629 \cdot \ln(H) + 53,902$
 $r = 0,17\%$

Con los resultados obtenidos de estos análisis, se puede apreciar que la velocidad del viento y las horas de sol en la

cuenca del río Pachitea, mantienen un comportamiento variable en su distribución espacial y temporal, alcanzando en promedio: 0,92 m/s y 40,71 %, respectivamente.

Estimación de la Evapotranspiración

El modelo fue aplicado a cada una de las estaciones seleccionadas que se encuentran ubicadas dentro de la cuenca del río Pachitea, obteniéndose la evapotranspiración mensual de referencia; mediante la aplicación del coeficiente de cultivo (K_c) se determinó el valor de la evapotranspiración del cultivo (ET_c).

Con dichos valores se procedió a calcular la evapotranspiración media areal a nivel mensual, para el período de análisis, registrando un comportamiento variable en su distribución espacial con valores que varían entre 56,36 mm y 138,88 mm, alcanzando a nivel anual un total de 1 135,16 mm. El año con menor evapotranspiración areal se registró en 1994/95 con 896,60 mm y con la mayor evapotranspiración areal 1970/71 con 1 354,24 mm, respectivamente.

Análisis de niveles de agua

La estación fue instalada en noviembre de 1994, desde entonces se viene registrando en forma continua la variación de los niveles del río, el cual registra un comportamiento variable en su distribución espacial y temporal con valores que fluctúan entre 0,56 m y 6,53 m a nivel mensual, alcanzando un valor medio anual de 2,78 m.

Estimación del caudal

Los análisis realizados entre las variables de altitud y caudal aforado, velocidad media del río y área mojada nos generó las expresiones algebraicas que se presentan a continuación:

- Altitud vs Caudal:
 $Q = 273,88 \cdot e^{0,4742 \cdot H}$ $r = 98\%$
- Altitud vs Área:
 $A = 639,72 \cdot e^{0,2122 \cdot H}$ $r = 96\%$

- Altitud vs Velocidad:
 $V = 0,3462 \cdot e^{0,2513 \cdot H} \quad r = 90\%$

Con la expresión algebraica, obtenida en el análisis de la curva altura - gasto, se procedió a generar los caudales medios mensuales, obteniéndose un caudal máximo de 6 052,01 m³/s ocurrido en marzo de 1999 y un caudal mínimo de 356,53 m³/s, ocurrido en setiembre de 1996; en promedio anual se tiene un caudal de 1 348,34 m³/s.

Modelos matemáticos

Durante la *Calibración* del modelo IPH-MEN, en función de las variables de precipitación, evapotranspiración y caudal, se estimaron los valores finales de cada uno de los parámetros, los cuales son:

| | | | | | |
|------|---|--------|----------------|---|-----------|
| A | = | 115,81 | Cr | = | 10,00 |
| B | = | 1,70 | α | = | 6,00 |
| C | = | 5,76 | R ² | = | 99 % |
| Ks | = | 0,25 | Vobs. | = | 31 283,07 |
| Ksub | = | 1,15 | Vcalculado | = | 31 367,00 |

Observándose que los resultados aquí obtenidos son buenos y que dichos parámetros representan muy bien el comportamiento del régimen hídrico del río Pachitea. La comparación entre los caudales observados y calculados da una diferencia porcentual media de -1,03 %, y un rango de variación de -23 % y 27 %, respectivamente (ver figura 2).

Validación. Los caudales generados en esta etapa fueron comparados con los observados, dando en promedio una diferencia porcentual de -3% y un rango de variación de -21% y 34% respectivamente, con lo cual se está corroborando que los valores de los parámetros encontrados para el modelo IPH-MEN, si representan muy bien el comportamiento real del caudal en el río Pachitea a nivel medio mensual (ver figura 3).

Simulación. Los valores de los caudales generados mediante el modelo IPH-MEN, registran un comportamiento variable con valores que fluctúan entre 118,64 m³/s y 3 338,06 m³/s, alcanzando en promedio un caudal de 788,95 m³/s (ver figura 4).

Discusión

La información hidrometeorológica utilizada en la presente investigación está constituida por la selección de 18 estaciones distribuidas en forma uniforme en toda la superficie de la cuenca. Dentro del grupo tenemos estaciones operativas con un registro continuo de datos desde 1965 hasta la fecha y otro grupo de estaciones paralizadas; sin embargo, éstas cuentan con un registro representativo de datos para el estudio, por lo cual también fueron consideradas dentro de los análisis.

Los análisis realizados para las variables de precipitación,

temperatura, viento y horas de sol, para la cuenca del río Pachitea, han permitido caracterizar y conocer a nivel temporal y espacial el comportamiento y distribución de dichos parámetros y zonificar las áreas en función de los resultados obtenidos.

Con respecto a la determinación de la evapotranspiración, se ha utilizado el método de Penman - Montieht.

Los datos de aforos obtenidos de las 4 campañas realizadas en el río Pachitea para la estación limnimétrica de Puerto Inca, fueron correlacionados con las alturas de mira para determinar la curva Altura - Gasto, obteniéndose con ellas las expresiones algebraicas que nos permitieron generar los caudales a nivel medio mensual. Sin embargo, hay que recalcar que sería conveniente contar con más información de aforo (en promedio 10 campañas de aforo) a fin de poder realizar la calibración de la curva con rangos de datos más amplios y que abarquen todo el período del hidrograma (avenida y estiaje).

La calibración del modelo se realizó para los años 1996/97 y 1997/98, período con el cual se logró estimar los valores de los 7 parámetros que tiene el modelo IPH-MEN. Debido a que no contamos con la suficiente información de niveles, como se describió en los párrafos anteriores, y teniendo en cuenta que dichos valores son referenciales, el ajuste realizado es el más representativo para la cuenca, considerando que sólo contamos con 4 años de información.

La validación del modelo se realizó para el año 1995/96, en función de los parámetros calibrados, obteniéndose resultados muy significativos como se muestra en los análisis realizados. Esto confirma que el modelo IPH-MEN responde bien a las características hidrometeorológicas de la cuenca y refleja el comportamiento hídrico del río Pachitea.

La simulación fue realizada para el período 1965/98, para lo cual se contó con los valores medios mensuales de precipitación y evapotranspiración. Con dichas variables y con los valores de los parámetros calibrados en las fases anteriores, se procedió a la generación de los caudales medios mensuales para el río Pachitea en la estación de Puerto Inca. Estos valores nos muestra el rango de variación de los caudales que han circulado por el río durante ese período, observándose un comportamiento uniforme en su distribución espacial y temporal.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- En el análisis del gradiente pluviométrico, se estimó que el régimen de precipitación en la cuenca del río Pachitea presenta dos comportamientos muy significativos:
 - Las precipitaciones medias, mínimas y máximas, aumentan con la altitud hasta la cuenca media en 4,5 mm/m, 3,26 mm/m y 9,03 mm/m, respectivamente.
 - A partir de la cuenca media hasta la parte alta, el régimen de precipitaciones medias, mínimas y máximas disminuyen con la altitud en proporción de 0,85 mm/

metro, 0,41 mm/m y 1,62 mm/m, respectivamente.

- El régimen de precipitación total anual para el período 1965/98 en la cuenca del río Pachitea, registra un comportamiento variable en su distribución espacial con valores que fluctúan entre 1 200 mm y 3 200 mm, alcanzando una media de 1 919,14 mm. El año más seco se registró en 1988/89, con una precipitación media areal de 1 322,18 mm, y el más húmedo en 1995/96, con una precipitación media areal de 2 489,46 mm.
- En la evaluación de las variables hidrometeorológicas, se determinó que la temperatura varía entre 11,2 °C y 32,5 °C y la humedad relativa entre 72 % y 95 %.
- El comportamiento a nivel medio de las variables temperatura, humedad relativa, velocidad de viento y horas de sol, representan valores de 23,8 °C, 84 %, 0,92 m/s y 40,71% respectivamente.
- En el análisis del gradiente térmico, se estimó que el régimen de temperaturas medias, mínimas y máximas en la cuenca del río Pachitea, presenta una tendencia decreciente con la altitud, que en promedio alcanza un valor de 0,01 °C/metro.
- La evapotranspiración media mensual en la cuenca del río Pachitea, para el período 1965/98, registra un comportamiento variable en su distribución espacial con valores que varían entre 75,15 mm y 185,18 mm, alcanzando a nivel anual un total de 1 135,16 mm. El año con menor evapotranspiración se registró en 1994/95 con 1 195,47 mm y con mayor evapotranspiración 1970/71 con 1 805,66 mm, respectivamente.
- Los niveles de agua del río Pachitea, registrados en la estación limnimétrica de Puerto Inca, presentan un comportamiento variable en su distribución espacial y temporal con valores que fluctúan entre 0,56 m y 6,53 m a nivel mensual, alcanzando un valor medio anual de 2,78 metros.
- En el período 1998-2000, en la cuenca se han realizado 4 campañas de aforo (13 estaciones), los cuales han sido distribuidos de tal manera que permitan registrar los valores de caudal de los ríos durante las épocas de estiaje y de avenida (2 por año).
- Para la estación limnimétrica de Puerto Inca, que cuenta con datos de altura de mira y aforos (4 campañas), se realizaron los análisis y estimación de las curvas Altura - Gasto, Altura - Área mojada y Altura - Velocidad media del agua, las cuales están representadas mediante expresiones algebraicas significativas. Dichas expresiones permitieron generar los caudales de agua a nivel mensual del río Pachitea.
- Los caudales generados para esta estación, registran un comportamiento variable en su distribución temporal con valores que varían entre 356,53 m³/s y 6052,01 m³/s; alcanzando un valor medio anual de 1 348,34 m³/s.
- En la calibración del modelo IPH-MEN, se utilizaron dos años hidrológicos (1996/97 y 1997/98) para la estimación de los valores de los parámetros del modelo, los cuales fueron realizados mediante la optimización automática.
- En la etapa de validación del modelo IPH-MEN, se utilizó el año hidrológico 1995/96, el cual no fue considerado en el proceso de calibración. Los caudales generados en esta etapa, al ser comparados con los caudales reales, dieron una diferencia porcentual media de -3,3%, y con valores mensuales que fluctúan entre -21,4% y 34,1% respectivamente.
- En la etapa de simulación del modelo IPH-MEN, se utilizó el período comprendido entre 1965/66 hasta 1997/98, abarcando un total de 34 años. La aplicación del modelo permitió generar los caudales medios mensuales para dicho período, los cuales registran un comportamiento variable en su distribución temporal; valores que fluctúan entre 118,64 m³/s y 3 338,06 m³/s, alcanzando en promedio un caudal de 788,95 m³/s.

Recomendaciones

- Mantener operativas las estaciones pluviométricas, meteorológicas e hidrológicas en la cuenca del Río Pachitea, debido a que ellas son las que permitirán caracterizar el comportamiento hidrometeorológico a nivel regional y local.
- Realizar evaluaciones de la pérdida de agua por evapotranspiración en la cuenca del río Pachitea, mediante la instalación de tanques de evaporación Tipo A, con el fin de cuantificar los valores y estimar el grado de influencia del bosque en dicho proceso.
- Instalar estaciones hidrológicas en los principales tributarios del río Pachitea, ya sea del tipo limnimétrica o limnigráfica, permitiendo de esta manera contar con mayor información de las variaciones de los niveles de los ríos, para realizar las evaluaciones de este importante recurso.
- Incrementar las campañas de aforo en la cuenca del río Pachitea, con la finalidad de contar con mayor información para mejorar las curvas Altura-Gasto, Altura - Área mojada y Altura - Velocidad media del agua.
- Mantener operativo el modelo IPH-MEN en la cuenca del río Pachitea, mediante una constante calibración de los parámetros del modelo, siempre y cuando se cuente con información hidrometeorológica disponible.
- Ampliar el presente trabajo de investigación en las otras cuencas amazónicas andinas, para lo cual es necesario empezar a seleccionar las estaciones hidrometeorológicas, a ser utilizadas e instalar otras si fueran necesarias, así como también realizar campañas de aforo a fin de obtener la calibración de la Curva Altura - Gasto.
- Realizar un análisis de la distribución del tipo de cobertura vegetal en la cuenca del Río Pachitea en función de las variables hidrometeorológicas (precipitación y temperatura) a nivel medio, máximo y mínimo.

Agradecimientos

El presente trabajo expone la Tesis de grado del autor prin-

cipal, la cual pudo llevarse a cabo gracias a una beca del proyecto AARAM-Perú que se desarrolla con fondos del programa ISP III del Instituto Interamericano de Investigación del Cambio Global (IAI). Agradece, asimismo, la licencia de estudios concedida por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y por el apoyo, colaboración y ayuda por la disponibilidad de la información hidrometeorológica utilizada.

BIBLIOGRAFIA

- Duque, R.; Barrios, A. 1988. Modelo de simulación hidrológica a escala mensual. Desarrollo del modelo y programa de computación para la autocalibración de parámetros. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras (CIDIAT), Mérida, Venezuela. 130 p.
- Estrela, T. 1992. Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos. Centro de Estudios Hidrográficos; Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Gabinete de Formación y Documentación, Madrid, España. 55 p.
- FAO. 1998. Crop evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage paper, 56. Roma, 301 p.
- Ferrer, J. 1992. Análisis estadístico de caudales de avenida. Centro de Estudios Hidrográficos; Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Gabinete de Formación y Documentación, Madrid, España. 42 p.
- García, J.; López, J. 1970. Fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial adaptada al trópico (15° N - 15° S). Trabajo presentado en la VIII Reunión Latinoamericana de Fitotécnia, Bogotá, Colombia.
- Obregón, E.; Tucci E. 1997. Simulación con modelo conceptual precipitación - descarga para extensión de series mensuales. Instituto de Pesquisas Hidráulicas de la Universidad Federal de Río Grande de Sul, Brasil. 26 p.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). 1994. Guía de prácticas hidrológicas. Programa de Hidrología de la Organización Meteorológica Mundial. Ginebra, Suiza. 250 p.
- Tucci, C. E. 1979. Modelo matemático en hidrología e hidráulica. Revista Brasileira em Engenharia (RBE). Tomo 3.
- Tucci, C. E. 1995. Modelo hidrológico mensual IPHMEN: Memorando N° 4, IPH/UFRGS, Porto Alegre-RS para CETEC-Fundación Centro Tecnológico de Minas Gerais. Diciembre.

FENOMENO "EL NIÑO" Y SU RELACION CON LAS CRECIDAS DEL RIO ICA

Renán Alegre De La Cruz *

Dirección General de Meteorología, SENAMHI, Jesús María, Lima

RESUMEN

Lo sucedido en Ica durante el último Fenómeno "El Niño" 97/98 se explica por un efecto combinado del Océano y la Atmósfera transfiriéndose las anomalías por las teleconexiones. Durante "El Niño" 40/41 ocurrieron lluvias inusuales con el consiguiente desborde del río Ica (Perú). Los principales factores que condicionaron las fuertes precipitaciones en las partes altas y medias de la cuenca fueron: a) Flujo de componente Este en niveles medios y altos, que favorecen el traslado de nubosidad de la Vertiente Oriental, b) Calentamiento diurno intenso en el desierto de Ica e ingreso del flujo de componente Oeste (brisas), trasladando aire con propiedades y características diferentes a las que provienen de la Amazonía, ocasionando una mayor inestabilidad en la atmósfera, c) Fuerte divergencia en niveles altos de la tropósfera sobre la región, que favorecen un mayor desarrollo vertical de la nubosidad, d) Fuerte pendiente en la cuenca entre los 500 y 2 000 msnm, e) Conos de deyección con fuerte pendiente y escasa vegetación.

1. INTRODUCCION

Durante el último fenómeno "El Niño" 97/98, Ica fue uno de los departamentos más afectados en el territorio peruano. Las fuertes precipitaciones ocurridas en la parte alta y media de la cuenca ocasionaron el desborde del río Ica, causando la inundación de la ciudad el 29 de enero de 1998.

Cada evento "El Niño" es diferente en la forma como se origina, en su evolución y en sus efectos en el país. A través de las teleconexiones esta variación climática afecta cualquier región del territorio nacional. Las anomalías en las precipitaciones no son muy deterministas, teniendo un importante componente estocástico; es así que cualquier parte del Perú es vulnerable a esas anomalías.

Objetivos

- Realizar el análisis meteorológico de los sistemas atmosféricos y las variables que condicionaron el desborde del río Ica, durante el evento "El Niño" 97/98.
- Cuantificar el porcentaje de variación de las precipitaciones en la parte alta de la cuenca del río Ica durante los eventos "El Niño" ocurridos en el periodo 1970 - 2000.
- Comparar los caudales promedio mensuales del río Ica con sus normales históricas durante episodios "El Niño" para el periodo 1925-2000.

2. MATERIALES Y METODOS

Materiales

- Imágenes de satélite e información de precipitaciones totales diarias, durante enero de 1998, en la cuenca alta del río Ica.
- Datos de precipitación: totales mensuales y normales históricas en las estaciones PLU-Tambo y PLU-Santiago de Chocorvos.
- Caudales promedios mensuales del río Ica, en el periodo 1925-2000.

Metodología

- a. *Análisis meteorológico de los sistemas atmosféricos y las variables que condicionaron el desborde del río Ica durante el fenómeno "El Niño" 97/98*

Se analizarán las condiciones sinópticas de Sudamérica en superficie y altura de los sistemas atmosféricos que condicionaron esta situación meteorológica, poco usual en esta región del país; además, se indicará los factores locales que favorecieron su ocurrencia en Ica.

- b. *Cuantificación del porcentaje de variación de las precipitaciones en la parte alta de la cuenca*

Se determinará el porcentaje de variación de los totales mensuales de las precipitaciones durante los eventos "El Niño" ocurridos en el periodo 1970 - 2000. Las dos estaciones pluviométricas seleccionadas se ubican en la cuenca alta del

* Ing. Meteorólogo de la Dirección General de Meteorología del SENAMHI.
e-mail: ralegre@senamhi.gob.pe

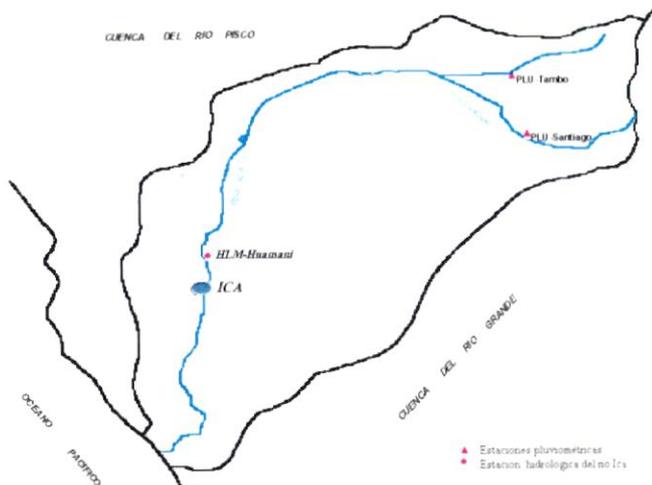


Figura 1. Cuenca del río Ica y la ubicación de las estaciones hidrometeorológicas

río Ica (ver figura 1), siendo sus coordenadas geográficas y altitud las siguientes:

| Estación | Latitud | Longitud | Altitud |
|-----------------------------|-----------|-----------|---------|
| PLU - Santiago de Chocorvos | 13° 50' S | 75° 15' W | 2 700 m |
| PLU - Tambo | 13° 41' S | 75° 16' W | 3 080 m |

Luego se analizarán cuantitativamente los porcentajes de variación. Además, se elaborarán gráficas del comportamiento de los totales mensuales de precipitación comparándolos con su normal histórica.

c. Comparación de los caudales promedio mensuales del río Ica con sus normales durante eventos "El Niño" para el periodo 1925 -2000

Se procederá a seleccionar años con ocurrencia de eventos "El Niño" en el periodo 1925 - 2000, comparando gráficamente los caudales promedios mensuales con sus normales. Los años seleccionados dependerán de la información hidrológica.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

a. Análisis meteorológico de los sistemas atmosféricos y las variables que condicionaron el desborde del río Ica durante el fenómeno "El Niño" 97/98

1) Condiciones Sinópticas a nivel de Sudamérica durante enero de 1998

Un sistema de baja presión ubicado en la selva del Perú (conocido como la Baja Amazónica), muy relacionado con las precipitaciones que ocurren en el territorio peruano, se mantuvo durante enero con valores bajos (1005 hPa), siendo lo normal 1008 hPa. La Baja Amazónica (B) en interacción con

los sistemas frontales (F) que ingresaron por el sur de Brasil (ver figura 2) y favorecidos por los vientos de componente Este en niveles medios y altos permitieron que estos sistemas generadores de precipitación se trasladaran a la parte central y sur del Perú, induciendo la ocurrencia de fuertes lluvias en repetidas oportunidades al este de la cordillera de los Andes (vertiente occidental), afectando principalmente las cuencas del Pacífico en la parte central del Perú y particularmente la del río Ica.

La imagen satelital de radiación en onda larga que se muestra en la figura 3 detalla valores inferiores a los 200 watts/m² sobre la parte central y sur del Perú, siendo un indicador de la formación de nubosidad convectiva (valores inferiores a los 200 watts/m² indican menor radiación emitida por la tierra debido a la presencia de nubosidad de gran desarrollo vertical en la región).

Las lluvias ocurridas en la cuenca alta del río Ica (2 700 a 3 100 msnm) superaron los 500% de anomalía en enero de 1998. Las precipitaciones se mantuvieron significativas a partir de la quincena de enero y las lluvias más intensas se presentaron al finalizar el mes, tal y como se observa en el comportamiento diario de las precipitaciones en las estaciones PLU-Tambo y PLU-Santiago de Chocorvos (ver figuras 4 y 5).

Simultáneamente, en el Océano Pacífico, frente a Ica, en el puerto de Pisco (latitud: 13° 40' S), la anomalía de la temperatura superficial del mar presentó en enero su valor más alto del evento Niño 97/98, con +3,6°C. Esta condición, en combinación con las brisas de mar y el fuerte calentamiento diurno del desierto de Ica, produjo el ingreso del flujo de aire en niveles bajos, con propiedades y características diferentes a las que provienen de la parte oriental del país; luego, al desplazarse por el interior de la cuenca y encontrarse con vientos inestables de la parte alta, condicionaron el ascenso de masas de aire, además, favorecidas por la fuerte divergencia en niveles altos de la tropósfera sobre la región, originando la formación de nubes, básicamente del tipo cumulonimbus, precipitando fuertemente durante la segunda quincena del mes, principalmente en la vertiente occidental.

Lo ocurrido en Ica se explica por un efecto combinado sucedido en el Pacífico y el Atlántico que se presenta por lo general durante la fase de declinación del fenómeno "El Niño". Se tiene referencias históricas que durante el verano de 1941 el río Ica también se desbordó, coincidentemente con el Niño 40/41 (según Eguiguren, Boletín de la Sociedad Geográfica de Lima); se presume que este evento "El Niño" fue similar en su origen y evolución al Niño 97/98.

2) Factores que condicionaron el desborde del río Ica

Los factores que condicionaron el desborde del río Ica se pueden dividir en dos:

Factores meteorológicos

A nivel Sudamérica, los sistemas atmosféricos que

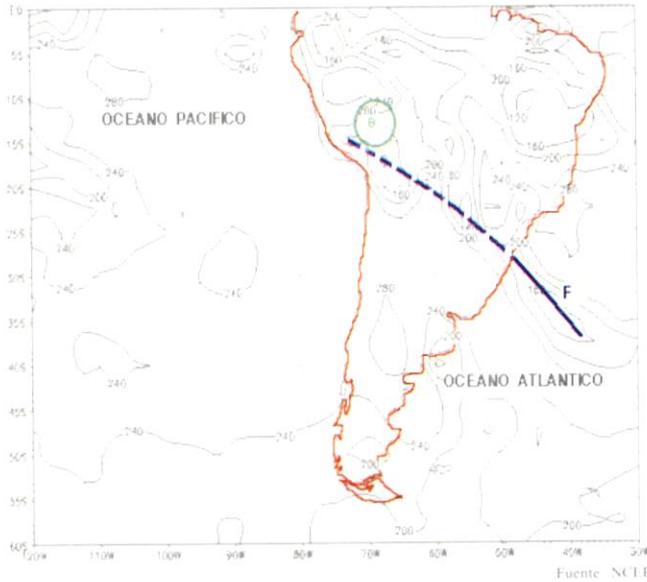


Figura 2. Distribución de radiación en onda larga sobre Sudamérica, correspondiente al 23 de enero de 1998 a las 19:00 Z. Obsérvese la ubicación de la Baja Amazónica (B) y el frente estacionario (F) que se mantuvo durante la segunda quincena de enero; estos sistemas condicionaron la ocurrencia de persistentes precipitaciones en la vertiente occidental de los Andes del centro y sur peruano.

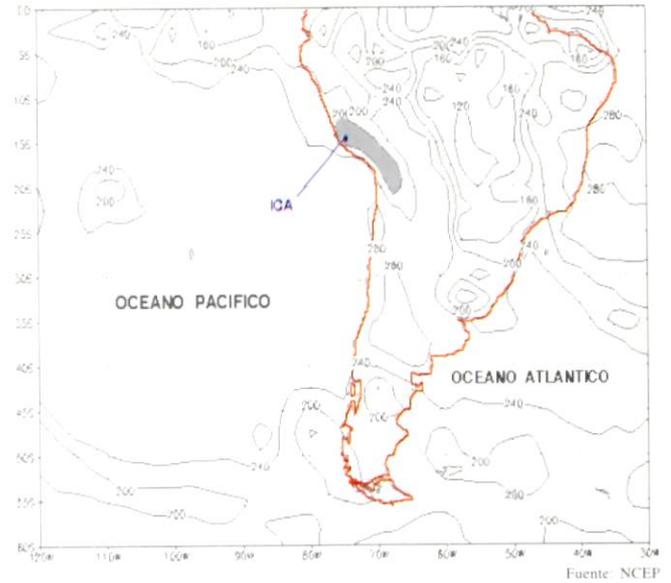


Figura 3. Radiación en onda larga sobre Sudamérica el 29 de enero de 1998 a las 19:00 Z. Obsérvese la fuerte actividad convectiva sobre la parte central y sur del Perú (coloración gris), provocando precipitaciones muy superiores a sus normales, principalmente en la parte alta de la cuenca del río Ica.

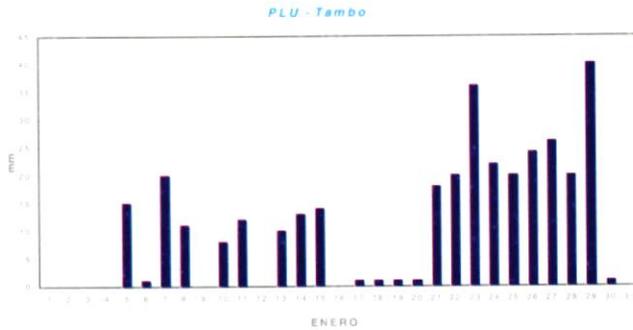


Figura 4. Comportamiento diario de la precipitación durante enero de 1998 en la estación pluviométrica Tambo.

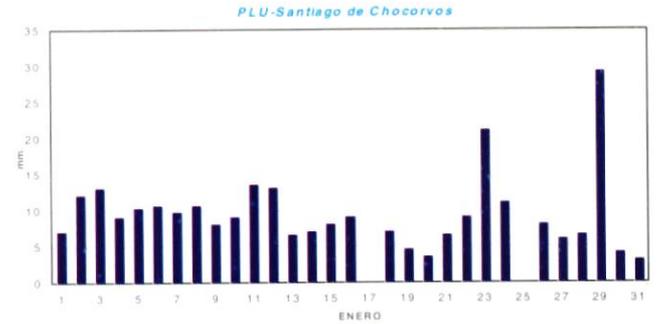


Figura 5. Comportamiento diario de la precipitación durante enero de 1998 en la estación pluviométrica Santiago de Chocorvos

favorecieron a que ocurriera este suceso extraordinario fueron:

- Ubicación del frente estacionario (15°S y 73°W a 35°S y 40°W) durante la segunda quincena de enero y que se mantuvo hasta la primera quincena de febrero de 1998, ingresando por el sur de Brasil.
- Ubicación favorable de la Baja Amazónica (13°S y 70°W), con valores de hasta 1 005 hPa, siendo la normal 1 008 hPa. Ocasiónó una profunda convección con mayor ascenso de masas de aire.
- Flujo de viento favorable de componente Este en niveles medios y altos, que provocaron el traslado de la nubosidad proveniente de la Amazonía a la vertiente occidental de los Andes.
- Calentamiento diurno intenso en el desierto de Ica e ingreso del flujo de componente Oeste (brisas), trasladando aire

con propiedades y características diferentes a un año normal que, al encontrarse con la masa de aire de la Amazonía, ocasionó una mayor inestabilidad atmosférica.

- Fuerte divergencia en niveles altos de la tropósfera sobre la región, que favorecieron un mayor desarrollo vertical de la nubosidad, formándose básicamente cumulonimbus.

Factores locales

A nivel de la cuenca del río Ica los factores locales que favorecieron al desborde del río fueron:

- Fuerte pendiente en la cuenca del río Ica, entre los 500 y 2 000 msnm.
- Escasa cobertura vegetal en la parte media de la cuenca
- Reducción del cauce del río al cruzar la ciudad de Ica

Tabla 1. Porcentajes de variación de la precipitación en Tambo durante los eventos "El Niño" ocurridos de 1970 al 2000

| | % Var. 72/73 | % Var. 76/77 | % Var.82/83 | % Var. 86/87 | % Var. 91/92 | % Var. 97/98 |
|------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Set | -100 | -100 | -100 | -100 | -100 | 2550 |
| Oct | 715 | -100 | -81 | -63 | 367 | -98 |
| Nov | -100 | -100 | -64 | -100 | 177 | -87 |
| Dic | 223 | -95 | -90 | -100 | -87 | 153 |
| Ene | 232 | -100 | -57 | 80 | -100 | 364 |
| Feb | 1 | 79 | -57 | -38 | -97 | -52 |
| Mar | 105 | -31 | -85 | -34 | -100 | -22 |
| Abr | 131 | -100 | 173 | -22 | -23 | -100 |
| May | -100 | -100 | 0 | 138 | -100 | -100 |
| Jun | -100 | -100 | -100 | -100 | -100 | -100 |
| Jul | -100 | -100 | -100 | -100 | -100 | -100 |
| Ago | -100 | -100 | -100 | -100 | -100 | -100 |

Tabla 2. Porcentajes de variación de la precipitación en Santiago de Chocorvos durante los eventos "El Niño" ocurridos de 1970 al 2000

| | % Var. 72/73 | % Var. 76/77 | % Var.82/83 | % Var. 86/87 | % Var. 91/92 | % Var. 97/98 |
|------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Set | -100 | -100 | -100 | -100 | -100 | 2200 |
| Oct | 140 | -100 | -100 | -100 | 60 | -100 |
| Nov | -82 | -100 | -100 | -100 | -100 | -100 |
| Dic | -49 | -100 | 44 | -100 | -13 | -63 |
| Ene | 74 | -94 | -97 | -31 | -100 | 718 |
| Feb | -11 | 73 | -98 | -67 | -100 | 134 |
| Mar | -12 | 18 | -17 | -59 | -100 | 0 |
| Abr | 76 | -100 | 175 | -100 | -100 | -89 |
| May | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Jun | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Jul | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ago | 131 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabla 3. Precipitaciones totales mensuales (mm/mes) en Tambo, durante los eventos "El Niño" ocurridos de 1970 al 2000

| | 72/73 | 76/77 | 82/83 | 86/87 | 91/92 | 97/98 | NORMAL |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|--------|
| Set | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 31.8 | 1.2 |
| Oct | 89.7 | 0.0 | 2.1 | 4.1 | 51.4 | 0.2 | 11.0 |
| Nov | 0.0 | 0.0 | 3.3 | 0.0 | 25.5 | 1.2 | 9.2 |
| Dic | 138.2 | 2.3 | 4.2 | 0.0 | 5.4 | 108.1 | 42.8 |
| Ene | 252.8 | 0.0 | 33.0 | 137.1 | 0.0 | 353.9 | 76.2 |
| Feb | 117.6 | 207.5 | 50.0 | 72.3 | 3.1 | 56.1 | 116.1 |
| Mar | 257.0 | 86.0 | 19.2 | 82.8 | 0.0 | 97.6 | 125.3 |
| Abr | 52.0 | 0.0 | 61.5 | 17.5 | 17.3 | 0.0 | 22.5 |
| May | 0.0 | 0.0 | 4.0 | 9.5 | 0.0 | 0.0 | 4.0 |
| Jun | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 |
| Jul | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | 0.0 | 0.0 | 0.2 |
| Ago | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.7 |

Tabla 4. Precipitaciones totales mensuales (mm/mes) en Santiago de Chocorvos, durante los eventos "El Niño" ocurridos de 1970 al 2000

| | 72/73 | 76/77 | 82/83 | 86/87 | 91/92 | 97/98 | NORMAL |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|--------|
| Set | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.3 | 0.0 |
| Oct | 6.0 | 0.0 | 27.6 | 0.0 | 4.0 | 0.0 | 2.5 |
| Nov | 2.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 11.0 |
| Dic | 65.2 | 0.0 | 185.9 | 0.0 | 111.6 | 48.1 | 129.0 |
| Ene | 59.0 | 2.0 | 1.0 | 23.5 | 0.0 | 278.0 | 34.0 |
| Feb | 50.2 | 98.0 | 1.4 | 18.8 | 0.0 | 132.6 | 56.6 |
| Mar | 77.3 | 103.0 | 102.1 | 35.8 | 0.0 | 87.5 | 87.5 |
| Abr | 15.0 | 0.0 | 23.4 | 0.0 | 0.0 | 0.9 | 8.5 |
| May | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Jun | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Jul | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Ago | 3.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.3 |

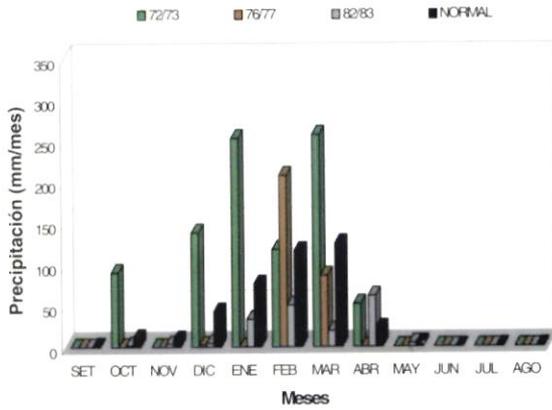


Figura 6. Precipitaciones totales mensuales comparadas con sus normales históricas en la estación pluviométrica Tambo, durante los eventos “El Niño” 72/73, 76/77 y 82/83

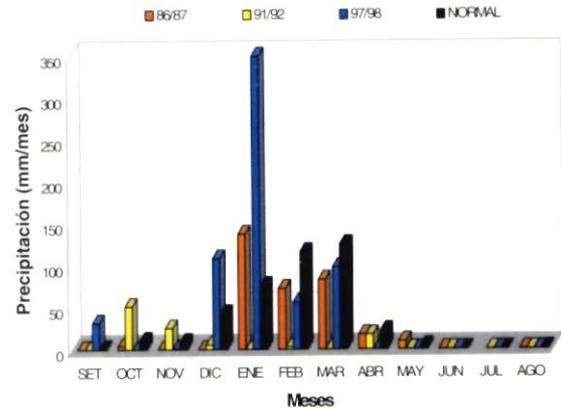


Figura 7. Precipitaciones totales mensuales comparadas con sus normales históricas en la estación pluviométrica Tambo, durante los eventos “El Niño” 86/87, 91/92 y 97/98

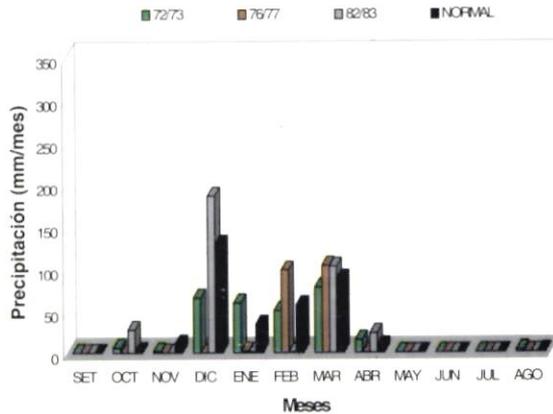


Figura 8. Precipitaciones totales mensuales comparadas con sus normales históricas en la estación pluviométrica Santiago de Chocorvos, durante los eventos “El Niño” 72/73, 76/77 y 82/83

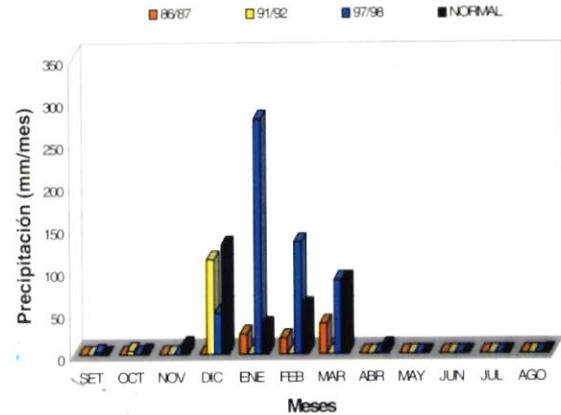


Figura 9. Precipitaciones totales mensuales comparadas con sus normales históricas en la estación pluviométrica Santiago de Chocorvos, durante los eventos “El Niño” 86/87, 91/92 y 97/98

- Cauce del río a mayor altura que la ciudad
- Conos de deyección con fuerte pendiente y escasa vegetación.

b. Cuantificación del porcentaje de variación de las precipitaciones en la cuenca alta del río Ica, durante los eventos “El Niño” ocurridos en el periodo 1970 - 2000

Los porcentajes de variación de precipitación por años para el periodo 1970 - 2000 se detalla en las tablas 1 y 2. Obsérvese que durante el último “Niño” 97/98 que afectó fuertemente al departamento de Ica, el porcentaje de variación de precipitación fue significativo al inicio del año hidrológico (setiembre).

Las tablas 3 y 4 detallan los valores totales mensuales de precipitación en las estaciones de Tambo y Santiago de Chocorvos, durante los eventos “El Niño” ocurridos en las tres últimas décadas.

Obsérvese que en el episodio “El Niño” 97/98, las lluvias

se iniciaron anormalmente en setiembre de 1997, cuando durante otros eventos Niños no se registraron precipitaciones al comienzo del periodo de lluvias.

Las precipitaciones totales mensuales comparadas con sus normales históricas en las estaciones pluviométricas Tambo y Santiago de Chocorvos, durante eventos “El Niño” presentadas en las tres últimas décadas, se observa en las figuras 6, 7, 8 y 9.

c. Comparación de los caudales promedios mensuales del río Ica con sus normales históricas, durante episodios «El Niño» para el periodo 1925-2000

Durante el período 1925 - 2000 se presentaron los siguientes episodios “El Niño”: 25/26, 30/31, 32/33, 39/40, 40/41, 41/42, 46/47, 51/52, 53/54, 57/58, 63/64, 65/66, 69/70, 72/73, 76/77, 77/78, 82/83, 86/87, 91/92, 92/93, 94/95 y 97/98 (según el CPTEC), seleccionándose para el presente estudio los episodios: 25/26, 32/33, 65/66, 72/73, 76/77, 82/83, 87,

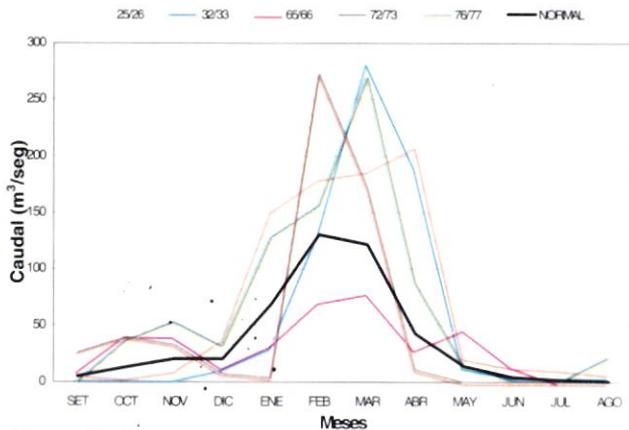


Figura 10. Caudales promedios mensuales del río Ica, durante los eventos "El Niño" 25/26, 32/33, 65/66, 72/73 y 76/77

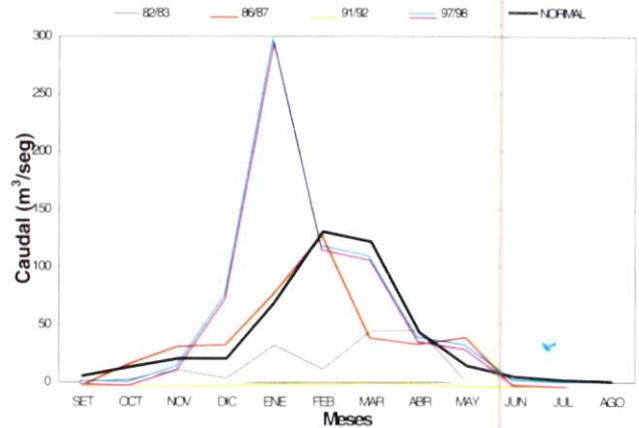


Figura 11. Caudales promedios mensuales del río Ica, durante los eventos "El Niño" 82/83, 86/87, 91/92 y 97/98

91/92 y 97/98, por la factibilidad de la información hidrológica. Al realizar el análisis gráfico de los caudales promedios mensuales del río Ica durante estos episodios y al evaluar el desarrollo e intensidad del fenómeno, se obtuvieron los siguientes resultados:

NIÑO 25-26: Durante este evento, el río Ica presentó caudales promedios mensuales superiores a sus valores normales (ver figura 10). Los caudales máximos no fueron significativos; además, por referencias históricas, el cauce del río Ica fue mayor al actual y con cobertura vegetal en sus taludes. "El Niño" 25-26 es catalogado de intensidad muy fuerte.

NIÑO 32-33: Niño catalogado de moderado a fuerte en intensidad. Durante marzo y abril de 1933 el caudal del río presentó valores promedios mensuales superiores a sus normales (ver figura 10).

NIÑO 40-41: En el verano de 1941 el río Ica se desbordó, sin embargo se carece de información hidrológica de ese año; coincidentemente este evento "El Niño" fue similar en su origen al último Niño del siglo (97/98).

NIÑO 65-66: Catalogado de moderada intensidad; no afectó en forma significativa la cuenca del río Ica, presentándose caudales promedios mensuales inferiores a sus normales (ver figura 10).

NIÑO 72-73: Se comienza a generar información de precipitación en la parte alta de la cuenca; en las estaciones PLU-Tambo y PLU-Santiago de Chocorvos, estaciones próximas a los ríos Tambo y Santiago respectivamente, afluentes del río Ica en la cabecera de la cuenca. Los caudales medios mensuales del río presentaron valores superiores a sus normales (ver figura 10); concordantemente, en la parte alta las precipitaciones fueron superiores a sus normales, pero uniformes en el espacio y tiempo, no ocasionando crecidas extraordinarias. Este episodio "El Niño" se catalogó de intensidad fuerte.

NIÑO 76-77: Débil en intensidad. En la parte alta de la cuenca, las precipitaciones se presentaron mayormente en febrero de 1977. El caudal del río Ica se presentó superior a su normal durante este mes (ver figura 10).

NIÑO 82-83: Muy fuerte en intensidad; el calentamiento de las aguas del mar se originó en la parte occidental del Océano Pacífico tropical, avanzando posteriormente a la parte oriental, aproximándose frente a la costa norte del país, no repercutiendo significativamente las anomalías de la temperatura superficial del mar al centro del país. En la cuenca alta del río Ica las precipitaciones se presentaron inferiores a sus promedios históricos, concordantemente los caudales medios mensuales del río fueron inferiores a sus normales (ver figura 11).

NIÑO 86/87: Catalogada de moderada intensidad, los caudales del río Ica se presentaron próximos a sus normales (ver figura 11).

NIÑO 91-92: También de moderada intensidad. Presentó una sequía intensa en la parte alta de la cuenca del río Ica. Las precipitaciones en las estaciones PLU-Tambo y PLU-Santiago de Chocorvos registraron totales mensuales próximos a cero en los meses de verano, como consecuencia de la ausencia de lluvias en esta región; el río presentó un estiaje durante el año hidrológico 91/92.

NIÑO 97-98: Uno de los más fuertes del presente siglo, se inició en marzo de 1997 y las anomalías de la temperatura superficial del mar ingresaron por la parte sur del país, abarcando gran parte del mar peruano. Las precipitaciones en las estaciones PLU-Tambo y PLU-Santiago de Chocorvos presentaron valores significativos en enero de 1998. Es importante mencionar que el desborde del río Ica se debió a su crecida extraordinaria, estimándose un valor próximo a los 1 050 m³/seg a las 10:00 pm del 29 de enero.

4. RECOMENDACIONES PARA EL DEPARTAMENTO DE ICA (PERU) ANTE PRÓXIMOS EVENTOS "EL NIÑO"

Ante próximos episodios "El Niño", se recomienda realizar las siguientes medidas preventivas y/o correctivas en esta región del país:

- Construir desfogos o aliviaderos en la parte media de la

cuenca, que permitiría desviar el río en caso de crecidas abruptas, como la ocurrida durante el último Niño 97/98.

- Crear barreras naturales (cobertura vegetal) en la parte alta y media de la cuenca, para reducir el escurrimiento e incrementar la infiltración y percolación cuando ocurran precipitaciones intensas, reduciendo de esta manera la probabilidad de deslizamientos.
- En los últimos años, algunos tramos del río Ica han reducido su cauce, recomendándose su ampliación.
- Usar las fallas geológicas de la región, porque el flujo de agua tanto superficial como subterránea está determinada por la tectónica de la zona, por ejemplo usar la falla de Comatrana permitirá disminuir el volumen de agua ante inusuales crecidas del río Ica.
- Otra alternativa es devolverle al río su cauce ancestral (Pampas de Villacurí), evitando de esta manera que cruce la ciudad de Ica, cuyo lecho actual se encuentra aproximada-

mente cuatro metros más alto que el centro de la ciudad.

BIBLIOGRAFIA

- Wolf, E. A. 1996. El Niño experimento climático de la naturaleza. Fondo de Cultura Económica, 1996.
- Kenn, R. A. 1982. The role of cross equatorial tropical cyclone pairs in the Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, N° 110. Páginas: 1440-1446.
- Nita, Ts And Motuki. 1987. Abrupt enhancement of convective activity the onset phase of the 1986-87 El Niño. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, N° 65. Páginas: 497-506.
- Mugica M., Ramón. 1980. El fenómeno de El Niño. *Piura Graf*. Página 52.
- Organización Meteorológica Mundial. 1992. *Boletín OMM*, 41 (4).
- Woodman P., Ronald. 1997. El Niño '97-'98, situación reciente y futura.

BALANCE HIDRICO SUPERFICIAL EN LA CUENCA DEL RIO LURIN, PERU

Julia Acuña Azarte *

Dirección General de Hidrología y Recursos Hídricos, SENAMHI, Jesús María, Lima

RESUMEN

El balance hídrico superficial de la cuenca del río Lurín, tiene como objetivo estimar la disponibilidad del recurso hídrico en su superficie; para ello se han analizado las principales variables que intervienen, tales como la precipitación, evapotranspiración y el escurrimiento. El balance hídrico permite estimar el caudal disponible en el punto de control hidrométrico Manchay, el cual es comparado con el medido en el mismo punto. Al respecto, el caudal estimado y medido fueron 3.81 m³/s y 3.68 m³/s respectivamente.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso escaso, a medida que se incrementa su uso; por ello es indispensable conocer su disponibilidad, para estimar en qué forma y medida es actualmente usado.

El estudio de los elementos del balance hídrico superficial (BHS) es considerado como un método de investigación del ciclo hidrológico y sus resultados constituyen la base para la planificación de proyectos de aprovechamiento integral del recurso agua. Asimismo, nos permite cuantificar y prevenir las consecuencias derivadas de las actividades ejercidas por el hombre.

Objetivo General

- Proporcionar un estudio que contenga información que permita realizar una adecuada planificación del recurso hídrico de la cuenca del río Lurín.

Objetivo Específico

- Estimar la disponibilidad del recurso hídrico superficial de la cuenca del río Lurín.

Justificación

A partir del conocimiento de los elementos del BHS es posible comparar los recursos aislados de agua de un sistema y establecer las graduaciones de sus efectos sobre las variaciones del régimen hidrológico.

2. REVISION DE LITERATURA

a. Balance hidrológico (UNESCO, 1983)

El conocimiento de la distribución, movimiento, cantidad, permanencia, variación y transporte del agua en los distintos lugares donde puede encontrarse, sirve para el conocimiento de su balance, ya que éste debe estar basado en el proceso global que gobierna el ciclo hidrológico.

Una forma general del balance de agua para cualquier cuerpo de agua e intervalo de tiempo será:

$$P + Q_{SI} + Q_{UI} - E - ET - Q_{SO} - Q_{UO} - \Delta s - n = 0$$

Donde :

- P = Precipitación
- Q_{SI} = Entrada de agua superficial a la cuenca
- Q_{UI} = Entrada de agua subterránea a la cuenca
- E = Evaporación
- ET = Evapotranspiración
- Q_{SO} = Salida de agua superficial
- Q_{UO} = Salida de agua subterránea
- Δs = Variación del almacenamiento de agua en la cuenca
- n = Término residual de discrepancia, error de medición.

Las unidades de la ecuación pueden ser expresadas en altura media de agua sobre la cuenca o cuerpo de agua (mm), como volumen de agua (hm³), o en forma de flujo (m³/s).

Para cálculos en áreas extensas y largos períodos de tiempo, se recomienda utilizar la ecuación simplificada:

$$\langle \overline{P} \rangle - \langle \overline{Q} \rangle = \langle \overline{ET} \rangle + n$$

$$Q = P - ET$$

Donde:

- ⟨P⟩ : Precipitación media del período y área
- ⟨Q⟩ : Caudal medio del período y área

* Ing. Agrícola. Dirección General de Hidrología y Recursos Hídricos del SENAMHI.
e-mail: julia.acuna@correoweb.com

(\overline{ET}) : Evapotranspiración media del período y área

n : Término de discrepancia

Esta ecuación es aplicable si los cambios de almacenamiento en un período largo de tiempo y en áreas extensas tiende a minimizarse y puede suponerse nulo.

La utilización de esta simplificación permite la construcción de mapas que pueden ser comparados entre sí.

b. Características del área de estudio

La cuenca del río Lurín se encuentra ubicada en la costa central del Perú, entre la latitud sur $11^{\circ}45'$ y $12^{\circ}30'$ y longitud oeste $76^{\circ}00'$ y $77^{\circ}00'$, y la totalidad de su superficie comprende las provincias de Lima y Huarochirí.

Esta cuenca se caracteriza por presentar un clima que varía de templado a gélido con presencia de alta humedad atmosférica y constante nubosidad durante el invierno.

Geológicamente, se ha desarrollado sobre el lecho de un cono aluvial producido en el Pleistoceno con presencia de sedimentos del Cretáceo y rocas volcánicas e intrusivas.

Fisiográficamente, presenta variación altitudinal significativa, extendiéndose desde el nivel del mar hasta los 5 312 msnm. En altitudes sobre los 4 000 msnm existen lagunas naturales, las cuales se encuentran entre cerros, cuyas cumbres muestran un desnivel topográfico con relación al valle, siendo este último de relieve irregular pues está cortado por quebradas.

3. MATERIALES Y METODOS

a. Parámetros geomorfológicos

Los parámetros geomorfológicos pretenden cuantificar determinados rasgos de la superficie de la cuenca del río Lurín, a través de índices y terminologías que el hidrólogo ha ideado para analizar las características físicas de la cuenca, ya que estas particularidades juegan un papel condicionante en su régimen hidrológico. Los parámetros utilizados son: área de la cuenca húmeda y área de la cuenca seca; perímetro de la cuenca; forma de la cuenca, que incluye el índice de compacidad y el factor de forma; descripción del sistema de drenaje; descripción del relieve de la cuenca; pendiente principal del río; coeficiente de masividad; coeficiente orográfico; y coeficiente de torrencialidad.

b. Variables que intervienen en el balance hídrico superficial

1) Información utilizada

(i) Cartografía

Para este estudio se contó con el apoyo cartográfico si-

guiente:

- Mapa de la cuenca del río Lurín a escala 1/500 000 publicado por la Dirección General de Hidrología y Recursos Hídricos del SENAMHI.
- Mapa de la cuenca del río Lurín a escala 1/150 000 publicado por la Dirección General de Hidrología y Recursos Hídricos del SENAMHI.
- Mapa físico político del Perú a escala 1/1 000 000 publicado por el Instituto Geográfico Nacional-IGN.
- Mapa de clasificación climática del Perú: Método de Thornthwaite a escala 1/1 000 000, publicado por la Dirección General de Meteorología del SENAMHI.

(ii) Información hidrometeorológica

Para la evaluación del balance hídrico de la cuenca del río Lurín se recopiló información de estaciones ubicadas alrededor y dentro de ella, con la finalidad de analizar la confiabilidad y calidad de la información de precipitación y caudales.

En la tabla 1, se muestra la relación de red de estaciones hidrometeorológicas utilizadas en el presente estudio.

(iii) Selección de subcuencas

Según las recomendaciones de la Guía Metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur (UNESCO, 1979), el BHS se realizó en puntos de control hidrométrico existentes en la cuenca; complementariamente a ello se evaluaron áreas sin control hidrométrico, subdividiéndose la cuenca del río Lurín en subcuencas. La selección se hizo tomando en cuenta el orden de los ríos y la superficie abarcada por cada una de ellas siendo las siguientes:

- Subcuenca Numincancha, que se inicia en la confluencia de las quebradas Chanape y Huarocancha dando origen al río Numincancha; está conformada por cinco lagunas y la de mayor extensión es Tucto. La subcuenca abarca 369 km² y se caracteriza por presentar relieve accidentado.
- Subcuenca Llacomayqui, ubicada en la margen izquierda del río Lurín, cuenta con un área de 70,1 km².
- Subcuenca Canchahuara, ubicada en la margen izquierda del río Lurín, comprende 164,7 km².
- Subcuenca Manchay, abarca 765,3 km² y se encuentra en la zona intermedia de la cuenca.
- Subcuenca Tinajas, abarca una superficie de 297,9 km² y se encuentra en la parte baja de la cuenca; se caracteriza por presentar un conjunto de quebradas pequeñas.
- La subcuenca del río Seco, abarca 397,4 km² y sus aguas desembocan en el Océano Pacífico, por ello no intervendrá en el análisis del BHS.

2) Estudio de las variables que intervienen en el balance hídrico superficial

Tabla 1. Red de Estaciones

| ESTACIONES | CUENCA | LATITUD | LONGITUD | ALTITUD | CATEGORIA |
|-------------------|---------|---------|----------|---------|-----------|
| Aeropuerto | Rímac | 12° 00' | 77° 07' | 13 | S |
| Hipólito Unanue | Rímac | 12° 04' | 77° 04' | 70 | CP |
| Manchay Bajo | Lurín | 12° 10' | 76° 52' | 148 | CO |
| Manchay | Lurín | 12° 10' | 76° 51' | 206 | HLM |
| Von Humboldt | Rímac | 12° 05' | 76° 57' | 238 | MAP |
| Ñaña | Rímac | 11° 59' | 76° 50' | 566 | CO |
| Antapucro | Lurín | 12° 02' | 76° 37' | 1 000 | HLG |
| Antioquía | Lurín | 12° 05' | 76° 30' | 1 869 | PLU |
| Matucana | Rímac | 11° 50' | 76° 23' | 2 378 | CO |
| Canta | Chillón | 11° 28' | 76° 37' | 2 832 | CP |
| Langa | Lurín | 12° 06' | 77° 26' | 2 860 | PLU |
| Santiago de Tuna | Lurín | 11° 59' | 76° 31' | 2 921 | PLU |
| San Lázaro de E. | Lurín | 12° 11' | 76° 21' | 3 600 | PLU |
| San José de Parac | Lurín | 11° 48' | 76° 15' | 3 800 | PLU |
| Chalilla | Lurín | 11° 56' | 76° 20' | 4 050 | PLU |
| Milloc | Rímac | 11° 34' | 76° 21' | 4 500 | PLU |

(i) *Precipitación*

- Análisis de consistencia de datos

A través de este análisis se pretende identificar errores de medición puntual, cuantificación estadística y ampliar los registros en estaciones faltantes, con el fin de estimar la precipitación areal, en forma más aproximada.

Se han elaborado histogramas, curvas de doble masa y realizado pruebas estadísticas correspondientes.

- Completación de datos faltantes de precipitación

La completación de datos de precipitación, fue realizada mediante la técnica de regresión lineal simple (RLS) que básicamente consiste en dibujar el diagrama de dispersión y ajustar una recta a ese diagrama, recta llamada línea de regresión que se usa para completar y extender la información faltante.

- Gradiente pluviométrico por regresión lineal

La curva del gradiente pluviométrico permite observar la variación de la precipitación con respecto a la altitud. Se construye relacionando la precipitación (P) y la altitud (A).

- Precipitación media areal

La precipitación media areal (Pm) permite calcular la precipitación representativa de la cuenca en forma ponderada. En el estudio se ha utilizado el método de las isoyetas, el cual consiste en plotear en un mapa las coordenadas geográficas de las estaciones a utilizar con sus respectivos valores puntuales; luego se interpola geoméricamente a fin de trazar las líneas de igual cantidad de precipitación utilizando criterios hidrológicos; seguidamente mediante la ayuda de un planímetro se determina el área comprendida entre dos isoyetas consecutivas, y la Pm se obtiene relacionando la sumatoria de las áreas parciales (Ai), la precipitación media de dos isoyetas consecutivas (Pi) y el área total evaluada (At).

(ii) *Temperatura y evapotranspiración*

- Gradiente térmico

La variable temperatura en la cuenca del río Lurín no es cuantificado en sus estaciones disponibles, por lo que se realizó un análisis integral de las cuencas del río Rímac, Chillón y Lurín.

El cálculo del gradiente térmico, consiste en relacionar la altitud (A -msnm) y temperatura (T-°C), de tal forma que se

obtiene una ecuación polinomial.

- Evapotranspiración

La evapotranspiración es la cantidad de agua que retorna a la atmósfera por los procesos de evaporación del agua de suelo y la transpiración de las plantas.

Para fines del presente estudio se consideró la evapotranspiración real, ya que la evaporación de lagunas se asumió en cero, dado que sus superficies son relativamente pequeñas comparadas con el área total de la cuenca.

El interés del cálculo de la evapotranspiración recae en la estimación de la cantidad de recurso hídrico existente en la cuenca del río Lurín. Éste se estimó por la fórmula de Turc en vista de ser más adaptable a las condiciones fisiográficas de la cuenca.

La fórmula de Turc (1955), aplicada en superficies naturales, relaciona la precipitación anual (P-mm) y el parámetro heliotérmico (L) siendo T la temperatura media anual (°C) y ETR la evotranspiración real. Sus expresiones matemáticas son:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

$$L = 300 + 25 \cdot T + 0,05 \cdot T^3$$

(iii) *Escorrentía*

- Análisis de consistencia de datos de caudales

Se ha elaborado el análisis de consistencia de los valores de caudales mediante la técnica de la curva de doble masa.

- Completación y/o extensión de datos de caudales

Los caudales medio multianuales de la estación Manchay se extendieron mediante la técnica de Regresión Lineal Simple, desde 1984 a 1999 basados en la información de la estación Chosica R-2.

- Estimación de caudales y escorrentía

Para cuencas de características fisiográficas, cobertura vegetal y comportamiento hidrológico similar, se puede estimar el caudal específico relacionando el área de la cuenca A_X , el caudal registrado en la cuenca Q_A y el área de la cuenca A_A mediante la siguiente expresión matemática:

$$Q_X = \frac{A_X}{A_A} \cdot Q_A$$

Cabe mencionar que también existe una ecuación matemática que relaciona la precipitación de la cuenca (P_X)

con la precipitación de la cuenca (P_X) cuya fórmula es:

$$Q_X = \frac{A_X \cdot P_X}{A_A \cdot P_A} \cdot Q_A$$

c. *Balance hídrico superficial*

1) Balance hídrico superficial en áreas con control hidrométrico

El balance hídrico superficial en áreas con control hidrométrico, sólo se desarrolló en el área de recepción de la estación Manchay, debido a que es la única estación de aforo, cuya información fue extendida debido a su paralización en 1980.

2) Balance hídrico superficial en áreas sin control hidrométrico

El BHS en las áreas sin control hidrométrico se realiza teniendo en consideración que no se puede calcular en forma directa la escorrentía superficial.

4. RESULTADOS

Los resultados del balance hídrico superficial en áreas con control hidrométrico y sin este se presentan en las tablas 2 y 3.

5. DISCUSION DE RESULTADOS

a. La evapotranspiración real fue calculada por el método de Turc; asimismo, se aplicaron factores de corrección en el caso de puntos con control hidrométrico. Se usó 0,95 y en puntos sin control 1,0, 0,8 y 0,7

b. El balance hídrico superficial se desarrolló para el período 1969 - 1999 en áreas con control hidrométrico y en áreas sin control hidrométrico:

- El área de recepción de Manchay recibe una lámina de precipitación de 298,6 mm equivalente a 408,8 MMC; la evapotranspiración real calculada fue de 210,9 mm, valor que representa el 70 % de la precipitación, un escurrimiento de 83,6 mm correspondiente a 3,63 m³/s y un índice de escurrimiento de 0,01.
- La cuenca del río Lurín recibe una lámina de precipitación de 236,4 mm equivalente a 394,1 MMC; la evapotranspiración real calculada fue de 185,9 mm, valor que representa el 61 % de la precipitación, un escurrimiento de 50,5 mm correspondiente a 2,67 m³/s y un índice de escurrimiento de 0,21.
- La subcuenca Numincancha recibe una lámina de precipitación de 550,8 mm equivalente a 203,2 MMC; la evapotranspiración real calculada fue de 182,0 mm, valor que representa el 33% de la precipitación, un escurrimiento de 368,8 mm correspondiente a 4,32 m³/s y un índice de

Tabla 2. Balance hídrico superficial en áreas con control hidrométrico

| Descripción | Precipitación mm/año | Evapotranspiración real y corregida mm/año | Caudal estimado por Balance hídrico | | Caudal promedio multianual | |
|------------------|-------------------------|--|--|-------------------|-------------------------------|-------------------|
| | | | mm/año | m ³ /s | mm/año | m ³ /s |
| Estación Manchay | 298,60 | 210,90 | 87,70 | 3,81 | 83,60 | 3,68 |

Tabla 3. Balance hídrico superficial en áreas sin control hidrométrico

| Descripción | Precipitación mm/año | Evapotranspiración real y corregida mm/año | Caudal estimado por Balance hídrico | | Caudal estimado por área de drenaje | |
|-----------------------|-------------------------|--|--|-------------------|--|-------------------|
| | | | mm/año | m ³ /s | mm/año | m ³ /s |
| Subcuenca Numincancha | 550,80 | 368,80 | 182,00 | 2,13 | 135,00 | 1,58 |
| Subcuenca Llacomayquí | 417,00 | 295,40 | 121,60 | 0,27 | 102,20 | 0,23 |
| Subcuenca Canchahuara | 463,00 | 327,20 | 135,80 | 0,71 | 113,50 | 0,59 |
| Subcuenca Manchay | 129,60 | 97,60 | 32,00 | 0,78 | 31,80 | 0,77 |
| Subcuenca Tinajas | 18,80 | 13,90 | 4,90 | 0,05 | 4,60 | 0,04 |

escurrimiento de 0,67.

- La subcuenca Llacomayquí recibe una lámina de precipitación de 417,0 mm equivalente a 29,2 MMC; la evapotranspiración real calculada fue de 295,4 mm, valor que representa el 71 % de la precipitación, un escurrimiento de 121,6 mm correspondiente a 0,270 m³/s y un índice de escurrimiento de 0,29.
- La subcuenca Canchahuara recibe una lámina de precipitación de 463,0 mm equivalente a 76,3 MMC; la evapotranspiración real calculada fue de 135,8 mm, valor que representa el 29 % de la precipitación, un escurrimiento de 327,2 mm correspondiente a 1,71 m³/s y un índice de escurrimiento de 0,70.
- La subcuenca Manchay recibe una lámina de precipitación de 129,6 mm equivalente a 99,2 MMC; la evapotranspiración real calculada fue de 97,6 mm, valor que representa el 75 % de la precipitación, un escurrimiento de 32,0 mm correspondiente a 0,78 m³/s y un índice de escurrimiento de 0,25.
- La subcuenca Tinajas recibe una lámina de precipitación de 18,8 mm equivalente a 5,6 MMC; la evapotranspiración real calculada fue de 13,9 mm, valor que representa el 74 % de la precipitación, un escurrimiento de 4,9 mm correspondiente a 0,046 m³/s y un índice de escurrimiento de 0,26.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- El caudal medio multianual medido en la estación

hidrométrica Manchay fue de 3,68 m³/s, equivalente a 83,6 mm de escurrimiento.

- El caudal medio multianual obtenido por Balance Hídrico Superficial en la estación hidrométrica Manchay fue de 3,81 m³/s, equivalente a 87,7 mm de escurrimiento.
- En la subcuenca Numincancha, se estima un escurrimiento de 182 mm que equivale a 2,13 m³/s; asimismo en la subcuenca Llacomayquí se estima un escurrimiento de 121,6 mm correspondiente a 0,27 m³/s; también en la subcuenca Canchahuara, se estima un escurrimiento de 135,8 mm correspondiente a 0,71 m³/s; en la subcuenca Manchay se estima un escurrimiento de 32 mm correspondiente a 0,78 m³/s; en la subcuenca Tinajas, se estima un escurrimiento de 4,9 mm correspondiente a 0,05 m³/s.

Recomendaciones

- Considerando que han ocurrido eventos hidrológicos extremos como El Niño 1997 / 1998, que han afectado considerablemente la orografía de la cuenca, las condiciones hidráulicas de sus cauces y modificado los valores estadísticos de tendencia central y de dispersión de las series hidrológicas, es recomendable actualizar periódicamente el estudio de balance hídrico superficial.
- Los resultados obtenidos del análisis de los datos efectuados en gabinete, es recomendable contrastarlos con información de campo, sobre condiciones de vegetación, hidráulica de ríos y quebradas, etc.
- La red hidrológica de la cuenca del río Lurín debe ser rehabilitada y ampliada, casos la estación climatológica

ordinaria (CO) Manchay Bajo, limnigráfica (HLG) Antapuero y limnimétrica (HLM) Manchay; asimismo, recategorizar las pluviométricas (PLU) Chalilla y Santiago de Tuna.

BIBLIOGRAFIA

- Aliaga Araujo, Vito. 1983. Tratamiento de datos hidrometeorológicos. Lima, Perú.
- Aparicio Mijares, Francisco. 1997. Fundamentos de hidrología de superficie. México.
- Binnie & Partners. 1970. Los recursos de agua para la gran Lima. Lima, Perú.
- Estrela, Teodoro. 1992. Metodología y recomendaciones para la evaluación de recursos hídricos. Editorial del Ministerio de Obras Públicas, Madrid, España.
- García Villanueva, Jerónimo. 1994. Principios físicos de climatología. Lima, Perú.
- INRENA-DGAS. 1994. Balance hídrico superficial de la cuenca del río San Juan. Estudio técnico. Lima, Perú.
- INRENA-DGAS. 1992. Estudio básico situacional de los recursos hídricos del Perú. Estudio técnico. Lima, Perú.
- Ministerio de Agricultura. 1992. Estudio básico situacional de los recursos naturales del Perú. Estudio técnico. Lima, Perú.
- Reyes Carrasco, Luis. 1992. Hidrología básica. Editorial AyB S.A. Lima, Perú.
- UNESCO – ROSTLAC. 1979. Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur. Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la UNESCO. Montevideo, Uruguay.

ESTUDIO DE MAXIMAS AVENIDAS Y DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL RIO CHANCAY - HUARAL

Wilfredo Ambrosio Ramos*

Dirección General de Aguas y Suelos, INRENA, San Isidro, Lima

RESUMEN

El presente estudio tiene por objetivos, estimar las descargas de máximas avenidas del río Chancay – Huaral (Perú), con los datos de la estación de aforo Santo Domingo, estimar las curvas de caudal sólido vs. caudal líquido de dicho río e identificar las posibles áreas inundables en el tramo en estudio (Bocatoma Chancay - Huaral hasta el Puente La Huaca).

Los resultados obtenidos muestran que el caudal de máxima avenida, obtenido mediante el método de Log Normal de III Parámetros para un período de retorno de 100 años, es de 373,82 m³/s; el volumen de sedimento transportado por arrastre de fondo corresponde a 58 540,5 t/d, obtenido mediante la fórmula de Meyer-Peter-Muller; el volumen de sedimentos transportados en suspensión se estima en 572 392,2 t/d y el volumen de transporte total calculado mediante la fórmula de Ackers y White resulta en 620414,966 ton/día equivalente a 2,72 m³/s.

Para la estimación de las posibles áreas inundables de un tramo del río de 5 500 m se utilizó el programa del HEC-RAS, resultando un tramo inundable de 3 135 m (1 640 m ubicados en la margen derecha y 1 495 m en la margen izquierda) cercano a los centros poblados de Boza Alta y Boza Baja.

1. INTRODUCCION

Generalidades

Los ríos de la costa del Perú son torrenciales, de fuertes pendientes y recorridos cortos, con descargas irregulares de gran capacidad de transporte sólido, con una marcada tendencia al desbordamiento, y a producir inundaciones.

El río Chancay-Huaral tiene estas características y presenta problemas de erosión y deposición de sedimentos e inundaciones de áreas de cultivos; para su prevención, es importante cuantificar, con cierto grado de aproximación, las descargas máximas y las variaciones de transporte de sedimentos, con el objetivo de dimensionar las diferentes estructuras hidráulicas y de protección a construirse en el cauce.

Objetivos

- Estimar las descargas de máximas avenidas del río Chancay – Huaral, en la zona del fundo Santo Domingo.
- Estimar las curvas de caudal sólido vs. caudal líquido del río Chancay – Huaral
- Estimar las posibles zonas inundables en el tramo en estudio (Bocatoma Chancay - Huaral hasta el puente La Huaca).

2. REVISION BIBLIOGRAFICA

- En 1982, el Plan de Rehabilitación de Tierras Costeras PLAN REHATIC, del Instituto Nacional de Ampliación de la Frontera Agrícola, realizó el estudio climatológico e hidrológico del valle Chancay-Huaral, en su etapa de rehabilitación de ocho valles de la costa peruana.
- En 1985, dentro del Plan Nacional de Rehabilitación de Tierras Costeras - PLAN REHATIC, se considera el Proyecto de Rehabilitación del Valle Chancay-Huaral, conocido como PLAN REHATIC III, solicitando para el efecto la cooperación técnica del gobierno japonés.
- En 1996, el Ministerio de Agricultura, a través de instituciones como INRENA - Dirección General de Aguas, PRONAMACHCS, y otras instituciones, en forma coordinada, iniciaron el estudio "Plan de reordenamiento del uso de agua de la cuenca Chancay-Huaral" con el fin de promover el mejor manejo, aprovechamiento, conservación y preservación de los recursos hídricos disponibles y evitar que el agua se convierta en factor limitante para dar la seguridad hídrica al agricultor.
- En agosto de 1996, el Instituto Nacional de Recursos Naturales - INRENA a través de la Dirección General de Aguas y Suelos dispuso llevar a cabo el Plan de Ordenamiento de los Recursos Hídricos de la cuenca Chancay-Huaral, con fondos provenientes del 30% de los recursos de la tarifa de agua de los usos no agrarios. Así, se elaboró el trabajo de "Actualización y Sistematización del Padrón de Usuarios, Inventario de Infraestructura de Riego y Drenaje.

* Ing. Agrícola, Dirección General de Aguas y Suelos de INRENA, San Isidro, Lima, Perú.
e-mail: wambrocio@dgas.gob.pe

Inventario de Fuentes de Agua en la cuenca Chancay – Huaral”.

- Según *Martín Vide* (1997), la inundación se define como la ocasión de daños por desbordamiento o derrame de las corrientes naturales, producto del escurrimiento de la lluvia y/o deshielo en cantidades tan grandes que no pueden alojarse en los cauces de las corrientes de niveles bajos.

3. MATERIALES Y METODOS

Información básica

- Cartas nacionales a escala 1/100 000, publicadas por el Instituto Geográfico Nacional - IGN.
- Unidades Hidrográficas de Análisis (UHA), a escala 1/150 000, publicadas por la ex - Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN), actualmente Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA)
- Información topográfica
- Información hidrometeorológica
- Información hidrológica
- Información bibliográfica

Equipos y materiales

- Equipo topográfico
- Equipo de laboratorio (estufa, tamices, balanza, etc.)
- Materiales de escritorio y equipo de cómputo

Métodos y procedimientos

Trabajo de campo

- Levantamiento de secciones transversales del tramo del río en estudio, obteniéndose un total de 21 secciones espaciadas a cada 250 m, en un tramo aproximado de 5,5 km.
- Muestreos de sedimentos de materiales sobre bancos de arena en ambas márgenes del río Chancay – Huaral y en el centro del cauce.

Trabajo de gabinete

- Tratamiento y procesamiento de la información
- Estimación de las máximas avenidas por los métodos de Gumbel, Pearson Tipo III, Log Pearson Tipo III, Log Normal de II Parámetros, Log Normal de III Parámetros.
- Estimación del cálculo de transporte de sedimentos de fondo mediante las fórmulas de Meyer – Peter - Muller, Einstein – Brown, y Kalinske
- Estimación del cálculo de transporte de sedimentos en suspensión mediante las fórmulas de Garde y Pande y de Samaga
- Estimación del cálculo de transporte de sedimentos de transporte de sólido total mediante los métodos de Ackers

y White y de Engelund y Hansen.

- Estimación de las zonas inundables en el tramo de estudio mediante el programa del HEC-RAS 2.0

El HEC-RAS es un programa integrado de análisis hidráulico que interactúa con el sistema a través del uso de gráficos de interfaces (GUI); el sistema es capaz de representar el cálculo del perfil de la superficie del flujo normal del agua.

Al crear una aplicación para el río con el HEC-RAS, se trabajará con un proyecto que es una colección de filas de datos asociados a un sistema particular de río que van a ser usados para generar un modelo. El modelador puede ejecutar cualquiera o todos los tipos de análisis, incluido en el paquete del HEC-RAS, como parte de un proyecto.

4. RESULTADOS

Estimación de máximas avenidas

Para el análisis de las descargas máximas de la cuenca del río Chancay – Huaral, se han utilizado los registros históricos máximos diarios de 77 años (1921/98) de la estación de aforo Santo Domingo (ver tabla 1). Para ello se ajustaron a 5 distribuciones de probabilidades con las cuales se obtuvieron los resultados de la tabla 2 por el Método de Momentos, y por el Método de Máxima Verosimilitud los de la tabla 3.

Para un mejor análisis de los datos hidrológicos de caudales, se realizaron algunas pruebas estadísticas comúnmente conocidas como: el método del error cuadrático mínimo, prueba de Chi-cuadrado, prueba de Kolmogorov-Smirnov (ver tabla 4). De donde se concluye que la función que mejor se ajusta a los datos es la de *Log Normal de III Parámetros*, para el método de momentos. Por tal motivo, el caudal de diseño para un período de retorno de 50 y 100 años es de $310,55 \approx 311,00 \text{ m}^3/\text{s}$ y de $373,82 \text{ m}^3/\text{s} \approx 374,00 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente.

El método de momentos es el que se ha utilizado preferentemente para el diseño hidrológico de las diferentes estructuras hidráulicas en los ríos de la costa peruana, por tal motivo se elige con relación al método de máxima verosimilitud.

Estimación del transporte de sedimentos

Para la estimación del transporte de sedimentos se tuvo que calcular los diámetros característicos de 4 secciones promedios de las 21 secciones transversales tomadas en el tramo de estudio (ver tabla 5); para el presente análisis se tomó la sección promedio S_3 por tener mejor resultado. Las muestras fueron tomadas en noviembre de 1997.

Para el cálculo del transporte de sedimentos de fondo se utilizaron las fórmulas de Meyer-Peter-Muller, Einstein-Brown y de Kalinske, obteniéndose los resultados de la tabla 6.

Asimismo, para el cálculo del transporte de sedimentos en suspensión se utilizaron las fórmulas de Garde y Pande y de Samaga, obteniéndose los resultados de la tabla 7.

Tabla 1. Registros históricos de caudales diarios máximos, de la estación de aforos Santo Domingo

| AÑO HIDROLOGICO | CAUDAL (m³/seg) |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 21-22 | 88,90 | 41-42 | 82,00 | 61-62 | 115,99 | 81-82 | 76,69 |
| 22-23 | 88,90 | 42-43 | 176,00 | 62-63 | 123,14 | 82-83 | 120,00 |
| 23-24 | 97,10 | 43-44 | 82,08 | 63-64 | 97,96 | 83-84 | 116,62 |
| 24-25 | 88,86 | 44-45 | 27,50 | 64-65 | 180,21 | 84-85 | 73,20 |
| 25-26 | 85,00 | 45-46 | 60,00 | 65-66 | 61,00 | 85-86 | 70,00 |
| 26-27 | 112,00 | 46-47 | 66,00 | 66-67 | 400,60 | 86-87 | 80,00 |
| 27-28 | 32,00 | 47-48 | 65,00 | 67-68 | 37,50 | 87-88 | 52,00 |
| 28-29 | 59,00 | 48-49 | 71,17 | 68-69 | 88,79 | 88-89 | 110,88 |
| 29-30 | 83,00 | 49-50 | 26,83 | 69-70 | 158,83 | 89-90 | 22,10 |
| 30-31 | 60,00 | 50-51 | 120,56 | 70-71 | 83,20 | 90-91 | 72,50 |
| 31-32 | 120,00 | 51-52 | 100,46 | 71-72 | 484,19 | 91-92 | 28,96 |
| 32-33 | 140,00 | 52-53 | 141,40 | 72-73 | 172,08 | 92-93 | 78,32 |
| 33-34 | 180,00 | 53-54 | 164,50 | 73-74 | 143,20 | 93-94 | 65,94 |
| 34-35 | 115,00 | 54-55 | 206,00 | 74-75 | 97,30 | 94-95 | 45,00 |
| 35-36 | 101,00 | 55-56 | 40,00 | 75-76 | 125,43 | 95-96 | 125,36 |
| 36-37 | 43,00 | 56-57 | 87,24 | 76-77 | 115,51 | 96-97 | 91,82 |
| 37-38 | 60,00 | 57-58 | 60,35 | 77-78 | 64,85 | 97-98 | 196,84 |
| 38-39 | 130,00 | 58-59 | 88,02 | 78-79 | 90,05 | 98-99 | 152,30 |
| 39-40 | 72,00 | 59-60 | 67,10 | 79-80 | 76,25 | | |
| 40-41 | 220,00 | 60-61 | 101,40 | 80-81 | 142,52 | | |

Tabla 2. Resultados del ajuste a cinco distribuciones de probabilidad por el Método de Momentos

| Periodos de Retornos (T) | METODO DE MOMENTOS | | | | |
|--------------------------|--------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| | Gumbel (m³/seg) | Pearson tipo III (m³/seg) | Log Pearson tipo III (m³/seg) | Log Normal de II Parámetros (m³/seg) | Log Normal de III Parámetros (m³/seg) |
| 2 | 93,835 | 83,979 | 89,063 | 89,717 | 85,414 |
| 5 | 161,183 | 148,717 | 142,850 | 143,202 | 140,400 |
| 10 | 205,774 | 206,747 | 183,662 | 182,838 | 185,664 |
| 20 | 248,546 | 268,649 | 220,010 | 223,671 | 235,584 |
| 30 | 273,152 | 311,585 | 249,450 | 248,505 | 267,388 |
| 40 | 290,500 | 332,951 | 267,698 | 266,544 | 291,119 |
| 50 | 303,911 | 354,331 | 287,280 | 281,041 | 310,554 |
| 100 | 345,398 | 421,033 | 337,174 | 326,750 | 373,824 |
| 200 | 386,735 | 488,934 | 390,758 | 375,352 | 444,159 |
| 300 | 410,877 | 512,114 | 414,922 | 407,468 | 492,229 |
| 400 | 427,996 | 523,022 | 440,580 | 426,856 | 521,823 |
| 500 | 441,270 | 529,839 | 467,825 | 444,216 | 548,678 |

Tabla 3. Resultado del ajuste a cinco distribuciones de probabilidad por el Método de Máxima Verosimilitud

| Periodos de Retornos (T) | METODOS DE MÁXIMA VEROSIMILITUD | | | | |
|--------------------------|---------------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| | Gumbel (m³/seg) | Pearson tipo III (m³/seg) | Log Pearson tipo III (m³/seg) | Log Normal de II Parámetros (m³/seg) | Log Normal de III Parámetros (m³/seg) |
| 2 | 94,201 | 95,306 | 88,1675 | 88,95 | 92,22 |
| 5 | 141,061 | 146,154 | 143,8114 | 141,11 | 143,48 |
| 10 | 182,087 | 178,925 | 187,1016 | 179,60 | 180,77 |
| 20 | 201,848 | 209,351 | 233,2213 | 214,71 | 214,44 |
| 30 | 218,969 | 228,677 | 260,8250 | 249,83 | 239,25 |
| 40 | 231,039 | 238,282 | 282,9744 | 262,05 | 255,21 |
| 50 | 276,371 | 247,352 | 301,3828 | 274,26 | 271,17 |
| 100 | 314,238 | 274,961 | 357,9858 | 318,46 | 312,90 |
| 200 | 351,999 | 301,793 | 420,7693 | 365,12 | 356,70 |
| 300 | 368,798 | 310,858 | 461,0560 | 387,08 | 377,18 |
| 400 | 386,709 | 315,124 | 489,0676 | 409,40 | 397,66 |
| 500 | 402,945 | 318,350 | 512,2792 | 431,01 | 418,14 |

Por último, para el cálculo del transporte de sólido total se utilizaron los métodos de Ackers y White y el de Engelund y Hansen, obteniéndose los resultados de la tabla 8.

Tabla 4. Resultado de tres pruebas estadísticas, aplicadas a los datos hidrológicos

| Métodos Estadísticos | Error cuadrático mínimo Orden preferente | Chi-Cuadrado (X²) Orden preferente | Kolmogorov Orden Preferente |
|------------------------------|--|------------------------------------|-----------------------------|
| Gumbel | 4 | Se rechaza | 4 |
| Pearson Tipo III | 2 | 1 | 3 |
| Log Pearson Tipo III | 5 | Se rechaza | Se rechaza |
| Log Normal de II Parámetros | 3 | Se rechaza | 1 |
| Log Normal de III Parámetros | 1 | 2 | 2 |

Tabla 5. Diámetros característicos de cuatro secciones transversales del río Chancay-Huaral

| Diámetros característicos (mm) | SECCIONES TRANSVERSALES PROMEDIOS | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | Sección 1 (S ₁) Diam (mm) | Sección 2 (S ₂) Diam (mm) | Sección 3 (S ₃) Diam (mm) | Sección 4 (S ₄) Diam (mm) |
| D _{med} | 0,863 | 0,828 | 0,830 | 0,941 |
| D ₁₅ | 0,263 | 0,266 | 0,249 | 0,239 |
| D ₃₅ | 0,470 | 0,448 | 0,427 | 0,422 |
| D ₄₀ | 0,543 | 0,509 | 0,488 | 0,495 |
| D ₆₅ | 0,891 | 0,842 | 0,881 | 0,921 |
| D ₈₄ | 1,651 | 1,479 | 1,564 | 1,725 |
| D ₉₀ | 1,989 | 1,893 | 2,069 | 2,172 |

Tabla 6. Resultados del cálculo de transporte de sedimentos de fondo

| Y(m) | Q(m³/s) | QB (Tn/día) | | QB (m³/día) | |
|------|---------|--------------------|----------------|-------------|--------------------|
| | | Meyer-Peter-Muller | Einstein-Brown | Kalinske | Meyer-Peter-Muller |
| 0,00 | 0,0 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 |
| 0,09 | 1,5 | 117,15 | 4,03 | 1417,50 | 44,50 |
| 0,18 | 4,73 | 754,35 | 45,57 | 3466,14 | 286,58 |
| 0,27 | 11,48 | 1949,55 | 190,81 | 5930,61 | 740,64 |
| 0,36 | 21,38 | 3675,70 | 520,60 | 8216,88 | 1396,41 |
| 0,46 | 34,62 | 5944,09 | 1134,68 | 10660,91 | 2258,18 |
| 0,55 | 51,36 | 8753,25 | 2145,17 | 13262,66 | 3325,39 |
| 0,64 | 71,68 | 12102,84 | 3675,86 | 15635,22 | 4597,91 |
| 0,73 | 95,69 | 15995,29 | 5860,21 | 18180,65 | 6076,66 |
| 0,82 | 123,79 | 20479,30 | 8885,99 | 20618,86 | 7780,15 |
| 0,91 | 155,45 | 25459,46 | 12837,61 | 23062,76 | 9672,13 |
| 1,00 | 191,02 | 30980,91 | 17907,58 | 25538,07 | 11769,74 |
| 1,09 | 230,57 | 37047,22 | 24268,36 | 28045,08 | 14074,36 |
| 1,19 | 274,14 | 43651,75 | 32090,50 | 30582,36 | 16583,44 |
| 1,28 | 322,35 | 50879,26 | 41701,22 | 33069,38 | 19329,19 |
| 1,37 | 374,00 | 58540,60 | 53025,13 | 35415,55 | 22239,76 |

Predicción de áreas inundables del tramo en estudio

Para la estimación de las posibles zonas inundables de un tramo del río de 5 500 m se utilizó el programa del HEC-RAS estimándose 8 tramos críticos, lo cual hace un tramo inundable de 3 135 m (1 640 m se ubican en la margen derecha y 1 495 m en la margen izquierda) ubicados en los centros poblados de Boza Alta y Boza Baja, siendo los probables afectados por el desborde del río.

5. DISCUSION DE RESULTADOS

- La extensión total de la cuenca del río Chancay-Huaral abarca un área de 3 517,50 km² y su cuenca húmeda o zona de recepción de lluvias, definida por la estación de aforo de Santo Domingo, ocupa un área de 1 847,80 km². La cuenca en estudio presenta un terreno accidentado con

Tabla 7. Resultados del cálculo de transporte de sedimentos en suspensión

| Y (m) | Q (m ³ /s) | QB (T/día) Garde y Pande | QB (T/día) Samaga | QB (m ³ /día) Garde y Pande |
|-------|-----------------------|--------------------------|-------------------|--|
| 0,00 | 0,0 | 1,00 | 1,00 | |
| 0,09 | 1,5 | 7,14 | 1,48 | 2,71 |
| 0,18 | 4,73 | 128,28 | 134,38 | 48,73 |
| 0,27 | 11,48 | 705,48 | 1919,90 | 268,01 |
| 0,36 | 21,38 | 2330,19 | 12382,03 | 855,25 |
| 0,46 | 34,62 | 5890,87 | 52620,88 | 2237,96 |
| 0,55 | 51,36 | 12572,73 | 171714,25 | 4776,42 |
| 0,64 | 71,68 | 23871,14 | 466837,88 | 9068,72 |
| 0,73 | 95,69 | 41596,63 | 1109954,25 | 15802,69 |
| 0,82 | 123,79 | 68265,72 | 2404745,04 | 25934,36 |
| 0,91 | 155,45 | 105780,28 | 4761979,21 | 40186,26 |
| 1,00 | 191,02 | 157213,52 | 8835452,18 | 59725,91 |
| 1,09 | 230,57 | 225750,49 | 15537008,13 | 85763,32 |
| 1,19 | 274,14 | 314867,59 | 26102322,51 | 119619,18 |
| 1,28 | 322,35 | 430030,59 | 42459810,13 | 163369,96 |
| 1,37 | 374,00 | 572392,19 | 66342038,01 | 217453,58 |

Tabla 8. Resultados del cálculo del transporte sedimentos totales

| Y (m) | Q (m ³ /s) | QB (Tn/día) Ackers y White | QB (Tn/día) Engeldud y Hansen | QB (m ³ /día) Ackers y White |
|-------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|---|
| 0,00 | 0,0 | 0,00 | 0,00 | |
| 0,09 | 1,5 | 2 968,95 | 354,28 | 1 127,91 |
| 0,18 | 4,73 | 12 298,22 | 3 572,12 | 4 672,13 |
| 0,27 | 11,48 | 27 836,66 | 13 972,12 | 10 575,23 |
| 0,36 | 21,38 | 48 879,32 | 36 339,54 | 18 569,41 |
| 0,46 | 34,62 | 75 421,73 | 76 325,87 | 28 652,95 |
| 0,55 | 51,36 | 107 291,61 | 139 985,26 | 40 760,42 |
| 0,64 | 71,68 | 144 361,46 | 233 787,43 | 54 843,37 |
| 0,73 | 95,69 | 186 560,08 | 364 588,33 | 70 874,76 |
| 0,82 | 123,79 | 234 450,47 | 541 886,42 | 89 068,47 |
| 0,91 | 155,45 | 286 667,53 | 769 267,92 | 108 905,89 |
| 1,00 | 191,02 | 343 754,73 | 1 056 218,23 | 130 593,50 |
| 1,09 | 230,57 | 405 696,43 | 1 410 935,68 | 154 125,34 |
| 1,19 | 274,14 | 472 346,35 | 1 841 261,85 | 179 445,86 |
| 1,28 | 322,35 | 544 726,12 | 2 362 732,78 | 206 943,16 |
| 1,37 | 374,00 | 620 414,97 | 2 969 925,44 | 235 697,58 |

una pendiente del 36,02%.

- La precipitación media anual en la parte baja de la cuenca (valle o zona agrícola) es reducida, e inferior a 100 mm (Plano de Isohietas Media Anual); sin embargo, en la cuenca alta (zona receptora de lluvias) la precipitación media anual se estima en 505,34 mm y su distribución en forma mensual es variable y estacional, concentrándose en los meses de verano, precipitando el 77,1% de la lámina promedio anual.
- El caudal anual al 50% de persistencia es de 14,224 m³/s equivalente a 450 MMC y al 75% es de 9,361 m³/s equivalente a 295 MMC. Los valores más bajos se registran en setiembre con 4,573 m³/s para el caudal medio, 4,377 m³/s para el caudal al 50% y 3,566 m³/s para el caudal al 75%. Los mayores valores se registran en marzo, con 45,289 m³/s para el caudal medio, 40,753 m³/s para el caudal al 50% y 26,301 m³/s para el caudal al 75%.
- Los caudales máximos del río Chancay-Huaral están influenciados por la zona alta de la cuenca. Históricamente, en un período de 77 años (1922/1998), entre 1967 y 1972 ocurrieron las descargas máximas más altas con 400,6 m³/s y 484,2 m³/s respectivamente. En 1950 se presentó la descarga máxima más baja con 26,8 m³/s.
- Los resultados del análisis estadístico de máximas avenidas realizado con los datos de descargas máximas para los métodos estadísticos de Log Normal de II Parámetros, Log Normal de III Parámetros, Gumbel, Pearson Tipo III y Log Pearson Tipo III, da como resultado que el registro histórico se acomoda mejor al método de Log Normal de III Parámetros, puesto que estamos determinando 3 parámetros a partir de la serie histórica, con lo cual quedará fijada mucho mejor la distribución basada en la prueba de

ajuste de Chi Cuadrado que arroja valores calculados inferiores a los valores tabulares; por lo tanto, para los análisis del cálculo del perfil hidráulico del río Chancay - Huaral se usarán los resultados correspondientes a este método.

- Los caudales máximos esperados según el método de Log Normal de III Parámetros para 2 años de período de retorno es de 85,415 m³/s, para 20 es de 235,584 m³/s y para 100 es de 373,824 m³/s.
- Con respecto al transporte de sólido de fondo en el río Chancay - Huaral, se puede concluir que las fórmulas de *Meyer-Peter - Muller*, *Einstein-Brown* y *Kalinske* proporcionaron resultados de descargas sólidas razonables. Es así que para un período de retorno de 100 años, el volumen erosionado por día en el tramo estudiado fue de 58 540,597 t/día, 53 025,126 t/día y 35 415,554 t/día respectivamente. Pero es el método de Meyer-Peter y Muller, el que se toma como el más adecuado porque la ecuación fue derivada para las siguientes características: pendiente 0,0004 a 0,02; diámetro medio de la partícula 0,0004 a 0,03 en metros; radio hidráulico 0,01 a 1,2 metros, entre otras características.
- Con respecto al transporte sólido en suspensión, podemos concluir que el método de *Garde y Pande* proporcionó resultados aceptables, ya que su aplicación en la ingeniería es hecha sólo cuando no es posible contar con mediciones de descargas de sedimentos en suspensión, llegando a obtenerse 572 392,187 t/día, equivalente a 6 625 kg/seg (2,52 m³/s).
- Con relación al transporte total de sedimentos, se concluye que el método de *Ackers y White* presenta resultados razonables en concordancia con los resultados de transporte

de fondo y en suspensión, llegando a obtenerse que para un período de retorno de 100 años el volumen erosionado por día en el tramo estudiado es de 620 414,9 t/día equivalente a 7 181 kg/seg (2,72 m³/s).

- Con respecto a la determinación de áreas inundables en la zona en estudio mediante la aplicación del Software HEC-RAS 2.0 se puede concluir que existen 8 tramos críticos con problemas de desbordes; la longitud de desborde total en el tramo en estudio para un caudal de 374 m³/s es de 3 135 m, 1 640 m se ubican en la margen derecha y 1 495 m en la margen izquierda. De donde el área de mayor peligro de inundación se ubica en los poblados de Boza Alta y Boza Baja, los probables afectados por los desbordes.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Los resultados del análisis estadístico de máximas avenidas realizado con los datos de descargas máximas para los métodos estadísticos de Log Normal de II Parámetros, Log Normal de III Parámetros, Gumbel, Pearson Tipo III y Log Pearson Tipo III, muestran que el método de Log Normal de III Parámetros aplicado a los datos hidrológicos es el que pasa satisfactoriamente las pruebas estadísticas adicionales, tales como el método del error cuadrático mínimo, prueba de Chi-cuadrado y prueba de Kolmogorov-Smirnov.
- La fórmula más adecuada para el transporte de sólido de fondo en el río Chancay-Huaral es la de *Meyer-Peter-Muller*. El método más adecuado para el cálculo del transporte sólido en suspensión es el de *Garde y Pande*. El método de *Ackers y White* para el cálculo del transporte total de sedimentos es el más adecuado.
- Con respecto a la determinación de áreas inundables en la zona en estudio mediante la aplicación del Software HEC-RAS 2.0, se puede concluir que existen 8 tramos críticos con problemas de desbordes; la longitud de desborde total en el tramo en estudio para un caudal de 374 m³/s es de 3 135 m, 1 640 m se ubica en la margen derecha y 1 495 m en la margen izquierda. De donde el área de mayor peligro de inundación se ubica en los poblados de Boza Alta y Boza Baja.

Recomendaciones

- Mejorar el manejo de las estaciones pluviométricas de la cuenca, realizando un mantenimiento y calibración del instrumental adecuado, así como realizar periódicas

inspecciones.

- Instalar una estación hidrométrica en la desembocadura del río Chancay-Huaral (Bocatoma Chancay-Huaral), para evaluar mejor los registros de caudales.
- Tratar de obtener a través del tiempo un registro histórico de sedimentos que permita realizar estudios más consistentes de transporte de sedimentos.
- Realizar mediciones de sedimentos en otros lugares de la cuenca que cuentan con estaciones hidrométricas, con el fin de encontrar relaciones que permitan obtener el transporte de sedimentos en otros puntos del río.

BIBLIOGRAFIA

- Aparicio M., Francisco Javier. 1997 Fundamentos de hidrología de superficie. Editorial Limusa, México.
- Chereque Mora, Wendor. 1991. Hidrología. Lima, Perú.
- Chow, Ven Te. 1994. Hidráulica de los canales abiertos. McGraw-Hill Interamericana, Santafé de Bogotá, Colombia.
- Chow, Ven Te. 1995. Hidrología aplicada. McGraw-Hill Interamericana, Santafé de Bogotá, Colombia.
- Comisión Federal de Electricidad. 1970. Manual de diseño de obras civiles. Sección E-Hidraulica. Instituto de Investigación de la Industria Eléctrica, México.
- Comisión Federal de Electricidad. 1981. Manual de diseño de obras civiles. Sección A, Hidrotecnia-Hidraulica, capítulo 11, Hidráulica fluvial. Instituto de Investigaciones de la Industria Eléctrica, México.
- Juárez Badillo. 1972. Mecánica de suelos. Tomos 2 y 3. Editorial Limusa, México.
- Lescano Rocha. 1969. Transporte de sedimentos. Publicación UNI, Lima-Perú.
- Linsley, Ray. 1971. Hidrología para ingenieros. 2da ed. McGraw-Hill, México.
- Martín Vide, Juan P. 1997. Ingeniería fluvial. Ediciones UPC, Barcelona.
- Mejía M. J., Abel; De Piérola C., José N. 1985. Estadística aplicada a la hidrología. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Molina, Medardo. 1970. Hidrología. Universidad Nacional Agraria La Molina. Publidrat, Lima -Perú.
- Rocha Felices, A. 1990. Transporte de sedimentos aplicado al diseño de estructuras hidráulicas. Colección del Ingeniero Civil, Libro 1. Capítulo de Ingeniería Civil del Colegio de Ingenieros del Perú, Lima, Perú.
- Villón B. Máximo. 1993. Hidrología estadística. Departamento de Ingeniería Agrícola. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Vival Párraga, Oswaldo. 1975. Análisis de frecuencias de descargas máximas para el río Rímac, mediante la utilización de la serie anual y la serie parcial. Tesis para optar el título de ingeniero agrícola. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Yevjevich, Vujica. 1972. Probability and statistics in hydrology water resources publications, Fort Collins, Colorado, USA.

APLICACION DE UN MODELO MULTIVARIADO PARA LA CONTRASTACION DE INFORMACION METEOROLOGICA EN LA ESTACION CP EL HUARANGAL (CONVENCIONAL VS. AUTOMATICA)

Luis R. Zevallos Cárhuaz,* y Arturo Saravia Moya

Oficina General de Estadística e Informática, SENAMHI, Jesús María, Lima

RESUMEN

El análisis multivariado es la parte de la estadística que trata del estudio y análisis de datos que incluyen medidas en muchas variables (específicamente, cuando se trabaja con más de dos variables dependientes).

El siguiente trabajo es una aplicación del análisis de varianza multivariada MANOVA, que es una extensión del análisis de varianza ANOVA, en donde se tiene en cuenta más de una variable de criterio. Es una técnica de dependencia que mide las diferencias de dos o más variables métricas dependientes basadas en un conjunto de variables categóricas (no métricas) que actúan como predictoras.

La aplicación se da por la necesidad de contar con información estadística significativa en el caso de validar la información meteorológica que registra la estación convencional y la estación automática, en la Estación CP El Huarangal, ubicada en Lima, Perú.

Se espera que los resultados obtenidos satisfagan los objetivos de demostrar que ambas estaciones registran información meteorológica bastantes similares. El periodo de recolección de información fue el siguiente: del 1999-08-01 al 1999-09-30, del 2000-01-01 al 2000-05-31 y del 2000-11-01 al 2000-11-31, realizando en total 486 registros.

1. INTRODUCCION

El presente trabajo de investigación trata de la contrastación de información meteorológica de dos estaciones, siendo una de ellas la Estación Climatológica Principal (CP) y la otra la Estación Automática Weather Link II, localizadas en El Huarangal.

En 1978 el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) y el SENAMHI firmaron un Convenio de Cooperación Técnica para realizar un estudio meteorológico en la zona de Huarangal, lugar donde se encuentra el Proyecto Centro Nuclear de Investigaciones del Perú (Centro Nuclear RACSO).

La estación climatológica El Huarangal tiene la categoría de Climatológica Principal (CP), está ubicada en el departamento y provincia de Lima, distrito de Carabayllo, a una altitud de 410 msnm, teniendo las siguientes coordenadas geográficas: 11°47'45" de latitud sur y 77°00'29" de longitud oeste, lugar en el que también está situada la estación automática.

Para la comparación de la información meteorológica utilizaremos técnicas estadísticas multivariadas, considerando las principales variables registradas por ambas estaciones. En el modelo propuesto utilizaremos las siguientes variables:

- Presión atmosférica media diaria de las 07:00, 13:00 y las 19:00 horas.
- Temperatura del aire seco media diaria de las 07:00, 13:00 y las 19:00 horas.
- Humedad relativa media diaria de las 07:00, 13:00 y las 19:00 horas.

El desarrollo de este trabajo de investigación se realiza dentro del campo de los modelos probabilísticos, esperando contribuir con el desarrollo de este tipo de modelos para futuras aplicaciones.

Debemos indicar además que desde junio del 2000, el SENAMHI no recibe información meteorológica de la estación convencional, siendo muy necesaria esta para los futuros análisis y contrastaciones con la estación automática.

Justificación

La necesidad de contar con elementos suficientes de información estadística para evaluar la similitud de información meteorológica registrada por la Estación CP El Huarangal a través de dos estaciones, siendo una de ellas convencional y la otra automática.

Objetivos

- Implementar un modelo de análisis de varianza multivariada MANOVA, para realizar contrastaciones de información

* Lic. Estadístico, Oficina General de Estadística e Informática del SENAMHI.
e-mail: lzevallos@senamhi.gob.pe

- meteorológica registrada por ambas estaciones.
- Probar que ambas estaciones envían información meteorológica estadísticamente similares para las variables analizadas.
- Mostrar además que al realizar la contrastación sólo se está trabajando con información registrada por ambas estaciones, demostrando que existe información que es registrada por la estación convencional y no por la estación automática.

Hipótesis general

Hipótesis 1

H_0 : El vector de medias de registros de información meteorológica (presión atmosférica diaria media, temperatura del aire seco media diaria, humedad relativa diaria media) analizadas para cada estación son iguales.

$$H_0 : \bar{\mu}_{CON} = \bar{\mu}_{AUT}$$

H_1 : El vector de medias de registros de información meteorológica (presión atmosférica diaria media, temperatura del aire seco media diaria, humedad relativa diaria media) analizadas para cada estación son diferentes.

$$H_1 : \bar{\mu}_{CON} \neq \bar{\mu}_{AUT}$$

Hipótesis 2

H_0 : La matriz de varianzas/covarianzas entre los grupos son iguales.

$$H_0 : \sum_{CON} = \sum_{AUT}$$

H_1 : La matriz de varianzas/covarianzas entre los grupos son diferentes.

$$H_1 : \sum_{CON} \neq \sum_{AUT}$$

2. REVISION DE LITERATURA

La literatura con respecto a estadística multivariada existe en amplitud.

F.H.C. Marriot (1982) cita lo siguiente: Si los resultados no coinciden con la información previa, no admiten una simple interpretación lógica, y no tienen una clara interpretación gráfica, probablemente están errados. No hay magia en los métodos numéricos y de muchas formas ellos pueden ser mal aplicados. Los métodos numéricos son una invalorable ayuda para la interpretación de los datos, ninguna máquina transforma conjuntos de números en paquetes de hechos científicos.

¿Cuándo se debe utilizar el MANOVA?

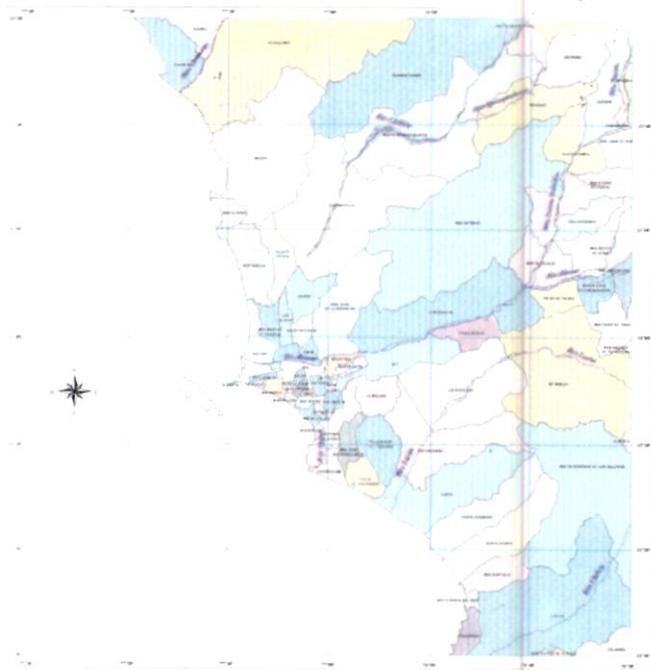


Figura 1. Mapa de ubicación de la estación El Huarangal.

El investigador puede obtener diferentes ventajas con el empleo del MANOVA, ya que esta técnica permite el examen de varias medidas dependientes simultáneamente. Se empleará el MANOVA desde las perspectivas de eficiencia y de control de la precisión estadística mientras nos proporcione la manera apropiada para contrastar cuestiones multivariantes.

Las ventajas del MANOVA frente a un conjunto de ANOVAs univariantes se dan en el campo estadístico ya discutido anteriormente, y también en su capacidad de proporcionar un único método de contrastar un amplio conjunto de cuestiones multivariantes diferentes.

El MANOVA tiene la flexibilidad de permitir que el investigador seleccione los contrastes estadísticos más apropiados para las cuestiones que le afectan. Hand y Taylor (1987) han clasificado los problemas multivariantes en tres categorías, cada una de las cuales emplea diferentes aspectos del MANOVA en su resolución. Estas tres categorías son preguntas de análisis univariante múltiple, análisis multivariante estructural y análisis multivariante intrínseco.

3. MATERIALES Y METODOS

El trabajo se desarrolló en el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, SENAMHI, en junio del 2001, a raíz de una sugerencia que hizo el IPEN; de paralizar la estación convencional El Huarangal y reemplazarla por la automática, para lo cual se encargó al autor realizar un estudio de homogeneidad de información meteorológica respecto de lo registrado por ambas estaciones.

A partir del problema planteado, se realiza un estudio de comparación de medias, un estudio de análisis de varianza univariada y un análisis de regresión. En esta oportunidad se

plantea un modelo de varianza multivariada; la razón de su aplicación es que, como ambas estaciones registran más de un parámetro en un determinado día, es conveniente realizarla al conjunto de la información que participa simultáneamente.

Periodo de análisis: 486 registros correspondiente a 8 meses.

Parámetros objeto de estudio que participan en el modelo:

- Presión atmosférica diaria media
- Temperatura del aire seco diaria media
- Humedad relativa diaria media

Las estaciones climatológicas son definidas como aquellas donde se efectúan observaciones para estudios climatológicos. El clima corresponde a las condiciones meteorológicas consideradas en un largo período de tiempo.

Dentro de las estaciones climatológicas existe la siguiente clasificación:

- Estación Climatológica Principal (CP)
- Estación Climatológica Ordinaria (CO)
- Estación Climatológica de Propósitos Específicos (PE)
- Estación Pluviométrica (PLU)

La estación convencional El Huarangal está considerada como una Estación Climatológica Principal porque realiza lecturas horarias de observación por lo menos tres veces al día, además de la tabulación horaria de las lecturas de los registros autográficos.

La estación meteorológica automática El Huarangal es aquella en donde el instrumental registra las observaciones en forma automática.

El modelo Manova para la comparación de g vectores de promedios poblacionales es:

$$X_{sj} = \mu + \tau_s + \varepsilon_{sj}, \quad j = 1, 2, \dots, n_s \quad \text{y} \quad s = 1, 2, \dots, g$$

donde los ε_{sj} son variables independientes Np (0, Σ), μ es el promedio general y τ_s representa el efecto del s-ésimo

tratamiento con
$$\sum_{s=1}^g n_s \tau_s = 0$$

Un vector de observaciones puede ser descompuesto como:

$$X_{sj} = \bar{x} + (\bar{x}_s - \bar{x}) + (x_{sj} - \bar{x}_s)$$

| | | | |
|-------------|----------|-------------|----------|
| Observación | Promedio | Efecto del | Residual |
| | General | Tratamiento | |

Manova es usado primero para investigar si los vectores de promedios poblacionales son los mismos y, si no, qué componentes promedios difieren significativamente.

Suposiciones acerca de la estructura de los datos

- a. 1. $x_{s1}, x_{s2}, \dots, x_{sns}$, es una muestra aleatoria de tamaño n_s de una población con media μ_s , $s = 1, 2, \dots, g$; las muestras aleatorias de poblaciones diferentes son independientes.
- b. Todas las poblaciones tienen una matriz de varianzas/covarianza común Σ.
- c. Cada población es normal multivariada (esta condición puede ser obviada con el uso del Teorema del Límite Central, cuando los n_s son grandes).

Regla de decisión

La H_0 , es rechazada si la razón de varianzas generalizadas es demasiado pequeña. Esta lambda (A^*) propuesta por Wilks tiene las distribuciones exactas, es decir, al contrastar con el nivel de significancia $\alpha = 0.05$, el p-value del estadístico de Wilks debería ser menor que el α propuesto y en consecuencia procedería a su rechazo de la hipótesis nula, en caso contrario no existirían razones estadísticamente suficientes para tal rechazo.

Si obtenemos un esquema del análisis de varianzas univariado y multivariado sería de la siguiente manera:

ANOVA

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

Hipótesis nula H_0 = las medias de todos los grupos son iguales, es decir, provienen de la misma población.

MANOVA

$$H_o : \begin{bmatrix} \mu_{11} \\ \mu_{21} \\ \vdots \\ \mu_{p1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{12} \\ \mu_{22} \\ \vdots \\ \mu_{p2} \end{bmatrix} = \dots = \begin{bmatrix} \mu_{1k} \\ \mu_{2k} \\ \vdots \\ \mu_{pk} \end{bmatrix}$$

Hipótesis nula H_0 = los vectores de las medias de todos los grupos son iguales, es decir, provienen de la misma población.

Donde:

$$\mu_{pk} = \text{media de la variable } p, \text{ del grupo } k.$$

Antes de calcular los contrastes estadísticos para la diferencia de las medias entre los grupos, primero debemos determinar si las medidas dependientes están significativamente correlacionadas. Este contraste examina las correlaciones entre todas las variables dependientes y evalúa si conjuntamente existe intercorrelación significativa.

El segundo está referido a la homogeneidad de las matrices de varianzas/covarianzas entre los dos grupos; se debe

evaluar conjuntamente las variables dependientes contrastando la igualdad del total de las matrices de varianzas/covarianzas entre los grupos. El contraste para la igualdad de las matrices de varianzas/covarianzas es el contraste M de Box.

4. RESULTADOS

Presentamos las siguientes tablas, en cada una de las cuales se muestran resultados de cálculos para cada uno de los parámetros analizados.

Tabla 1. Matriz de correlaciones

| | | P. ATM | P. ATM | HUMED |
|--------|---------------------|--------|--------|--------|
| P. ATM | Pearson Correlation | 1,000 | -0,657 | 0,598 |
| | N | 486 | 486 | 486 |
| P. ATM | Pearson Correlation | -0,657 | 1,000 | -0,888 |
| | N | 486 | 486 | 486 |
| HUMED | Pearson Correlation | 0,598 | -0,888 | 1,000 |
| | N | 486 | 486 | 486 |

Donde:

- P.ATM. : Presión Atmosférica Diaria Media
- TEMPER. : Temperatura del Aire Seco Diaria Media
- HUMED. : Humedad Relativa Diaria Media

Tabla 2. Tabla de la prueba de M Box, para la prueba de igualdad de la matriz de varianzas y covarianzas

Prueba de Box sobre la igualdad de las matrices de covarianza

| | |
|---------------|---------|
| M de Box | 5,884 |
| F | 0,974 |
| G11 | 6 |
| G12 | 1697251 |
| Significación | 0,441 |

Contrasta la hipótesis nula en la que las matrices de covarianza observadas de las variables dependientes son iguales en todos los grupos.

Tabla 3. Tabla de las unidades según estación

| | Código | N |
|----------|--------------|-----|
| Estación | Convencional | 243 |
| | Automática | 243 |

Tabla 4. Tabla de las estadísticas descriptivas (media, desviación estándar, tamaño de unidades participantes).

ESTADISTICOS DESCRIPTIVOS

| | Tipo de Estación | Media | Desv. Est. | N |
|---------|------------------|--------|------------|-----|
| P. ATM. | Convencional | 955,82 | 1,50 | 243 |
| | Automática | 955,99 | 1,48 | 243 |
| | Total | 955,90 | 1,49 | 486 |
| TEMPER. | Convencional | 21,12 | 3,61 | 243 |
| | Automática | 21,16 | 3,77 | 243 |
| | Total | 21,14 | 3,69 | 486 |
| HUMED. | Convencional | 74,16 | 8,60 | 243 |
| | Automática | 74,17 | 9,72 | 243 |
| | Total | 74,16 | 9,17 | 486 |

Tabla 5. Tabla del modelo de análisis de varianza multivariada. MANOVA

CONTRASTES MULTIVARIADOS

| Efecto | Valor | F | GI de la Hipótesis | GI del Error | Significación | |
|------------|--------------------|----------|----------------------|--------------|---------------|-------|
| Intercept. | Traza de Pillai | 1,000 | 1,2E+08 ^a | 3,000 | 482,000 | 0,000 |
| | Lambda de Wilks | 0,000 | 1,2E+08 ^a | 3,000 | 482,000 | 0,000 |
| | Traza de Hotelling | 736726,1 | 1,2E+08 ^a | 3,000 | 482,000 | 0,000 |
| | Raiz mayor de Roy | 736726,1 | 1,2E+08 ^a | 3,000 | 482,000 | 0,000 |
| ESTAC. | Traza de Pillai | 0,006 | 0,981 ^a | 3,000 | 482,000 | 0,401 |
| | Lambda de Wilks | 0,994 | 0,981 ^a | 3,000 | 482,000 | 0,401 |
| | Traza de Hotelling | 0,006 | 0,981 ^a | 3,000 | 482,000 | 0,401 |
| | Raiz mayor de Roy | 0,006 | 0,981 ^a | 3,000 | 482,000 | 0,401 |

a. Estadístico exacto

b. Diseño : intercept + ESTAC

Tabla 6. Tabla de la prueba del efecto entre los parámetros participantes en el modelo

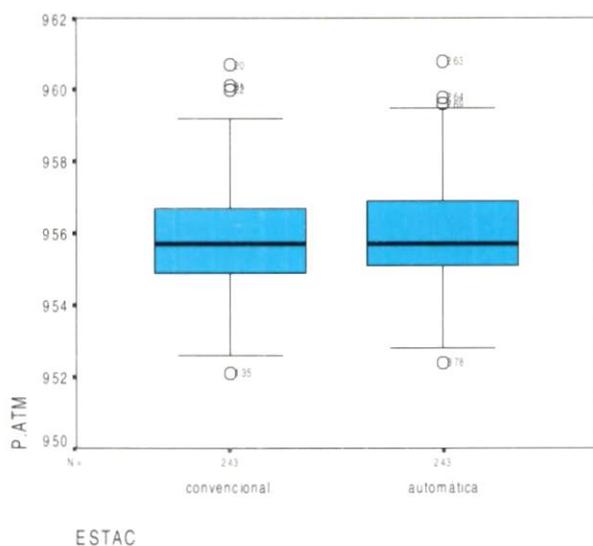
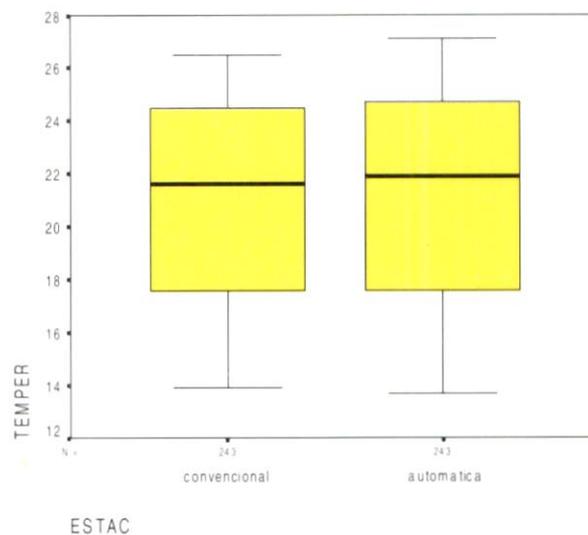
PRUEBAS DE LOS EFECTOS INTER-SUJETOS

| Fuente | Variable dependiente | Suma de cuadrados tipo III | Gl | Media cuadrática | F | Significación |
|------------------|----------------------|----------------------------|-----|------------------|-----------|---------------|
| Modelo corregido | P. ATM. | 3,292 ^a | 1 | 3,292 | 1,479 | 0,225 |
| | TEMPER. | 0,145 ^b | 1 | 0,145 | 0,011 | 0,918 |
| | HUMED. | 3,292E-02 ^b | 1 | 3,292E-02 | 0,000 | 0,984 |
| Intercept | P. ATM. | 444082654 | 1 | 4044E+08 | 2,0E+08 | 0,000 |
| | TEMPER. | 217174,603 | 1 | 217174,603 | 15936,153 | 0,000 |
| | HUMED. | 2673189,169 | 1 | 2673189,2 | 31729,405 | 0,000 |
| ESTAC | P. ATM. | 3,292 | 1 | 3,292 | 1,479 | 0,225 |
| | TEMPER. | 0,145 | 1 | 0,145 | 0,011 | 0,918 |
| | HUMED. | 3,292E-02 | 1 | 3,292E-02 | 0,000 | 0,984 |
| Error | P. ATM. | 1077,384 | 484 | 2,226 | | |
| | TEMPER. | 6595,852 | 484 | 13,628 | | |
| | HUMED. | 40776,798 | 484 | 84,250 | | |
| Total | P. ATM. | 444083735 | 486 | | | |
| | TEMPER. | 003770,600 | 486 | | | |
| | HUMED. | 2713966,000 | 486 | | | |
| Total corregida | P. ATM. | 1080,676 | 485 | | | |
| | TEMPER. | 6595,997 | 485 | | | |
| | HUMED. | 40779,831 | 485 | | | |

a. R cuadrado = 0,003 (R cuadrado corregida = 0,001)

b. R cuadrado = 0,000 (R cuadrado corregida = - 0,002)

Presentamos los siguientes gráficos, en cada una de los cuales se displayan cada uno de los parámetros analizados.


Figura 2. Gráfico de Box Plot del parámetro presión atmosférica diaria media, medida en mb (milibares)

Figura 3. Gráfico de Box Plot del parámetro temperatura del aire seco diaria media, medida en °C (grados centígrados)

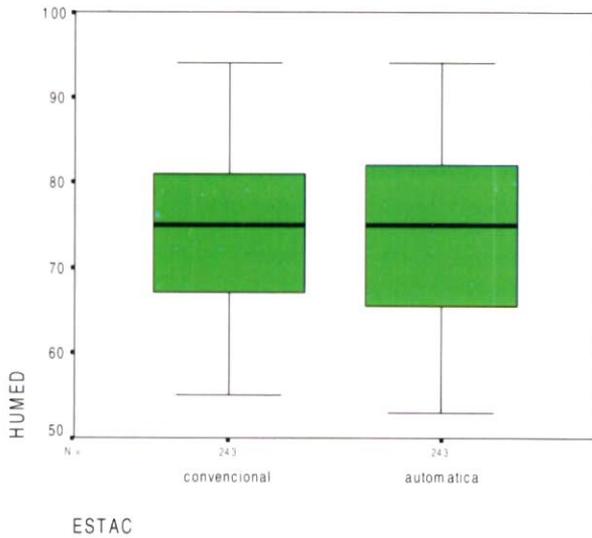


Figura 4. Gráfico de Box Plot del parámetro humedad relativa diaria media, medida en % (unidades porcentuales)

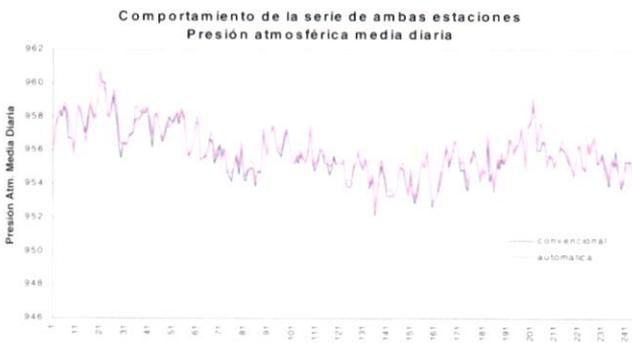


Figura 5. Gráfico de la serie del parámetro presión atmosférica media diaria

DISCUSION

De la Tabla 1 se puede observar que las correlaciones existentes entre las variables dependientes son estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 95%, es decir que entre ellas va a existir una alta correlación. Vale decir que entre las variables analizadas va a existir una correlación que permite que una dependa de la otra.

De la Tabla 2 logramos contrastar la hipótesis de homogeneidad de la matriz de varianzas/covarianzas, en donde se prueba la siguiente regla:

- Si el p-value = sig = 0,441 < a = 0,05, si esto es afirmativo entonces se rechaza Ho.
- Pero como no es cierto, porque sig = 0,441 > a = 0,05, entonces podemos afirmar que la matriz de varianzas/covarianzas de los dos grupos son iguales, es decir, no



Figura 6. Gráfico de la serie del parámetro temperatura del aire seco media diaria

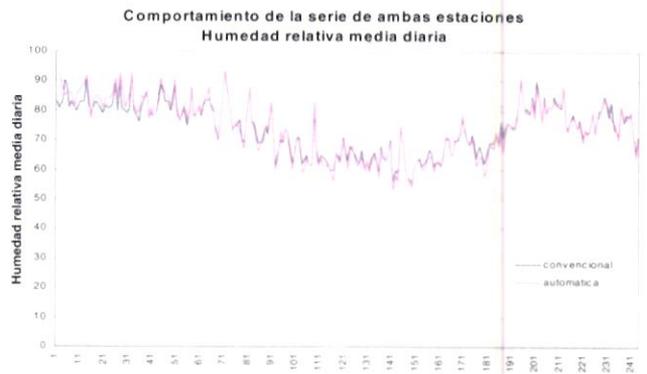


Figura 7. Gráfico de la serie del parámetro humedad relativa media diaria

existe una alta variabilidad en las matrices de varianzas/covarianzas que produzcan el rechazo de la hipótesis nula. Este modelo nos permite asegurar que no va a existir una variabilidad significativa en el conjunto de información analizada.

Tabla 3 se refiere al tamaño de información analizada en el presente estudio. Para este caso se realizó un estudio de 486 registros correspondientes a 8 meses entre los años 1999 y 2000.

La Tabla 4 se refiere a las estadísticas descriptivas halladas para cada una de las variables motivo de estudio; por ejemplo, para el parámetro Presión Atmosférica Diaria Media tenemos que la estación convencional nos arroja una media de 955.82 con una desviación estándar de 1,504, es decir que los datos están dispersos 1,504 unidades respecto del valor promedio del parámetro mostrado. El mismo parámetro registrado por la estación automática nos brinda una media de 955.98 con una desviación estándar de 1,48; a simple vista, los estadígrafos muestran bastante similitud y aproximación entre ellas. El mismo análisis se realiza para el parámetro Tempera-

tura del Aire Seco Diaria Media: la estación convencional nos arroja una media de 21,12 con una desviación estándar de 3,609, es decir que los datos están dispersos 3,609 unidades respecto del valor promedio del parámetro mostrado; En tanto que el mismo parámetro registrado por la estación automática, nos brinda una media de 21,156 con una desviación estándar de 3,77. Asimismo, para el parámetro Humedad Relativa Diaria Media, se tiene que la estación convencional registra una media de 74,16 con una desviación estándar de 8,6, mientras que la estación automática registra una media de 74,17 con una desviación estándar de 9,72.

La Tabla 5 desarrolla el modelo descrito y propuesto; lo que nos interesa saber es el efecto de la medición registrada de información meteorológica en ambas estaciones (grupos).

El estadígrafo que nos interesa analizar es el estadístico Lamda Wilks con un $p\text{-value} = \text{sig} = 0,401$. El $p\text{-value}$ para el estadístico Lamda Wilks es la probabilidad de caer en la región de rechazo fijado por nosotros, siendo igual a $\alpha = 0,05$. La regla de decisión dice lo siguiente: si el $p\text{-value} = 0,401 < \alpha = 0,05$, entonces se rechaza la hipótesis nula. Pero como no lo es, entonces estamos en condiciones de afirmar que el vector promedio para cada uno de los parámetros meteorológicos analizados es igual en cada estación analizada. Este estadístico realiza el análisis en forma conjunta.

Los demás estadígrafos participan en el modelo no siendo relevantes su interpretación para efectos del presente estudio.

La Tabla 6 está referida al análisis del efecto del registro de información entre los parámetros participantes en el modelo. En realidad es un complemento del análisis en conjunto, sino que esta tabla lo divide de acuerdo a la fuente de análisis según indica el modelo.

En ella también contrastamos la significancia y comprobamos que para un nivel de significancia propuesto por nosotros $\alpha = 0,05$, el efecto del grupo no es significativo ya que son mayores que 0,05. Es decir que existe similitud de información en cuanto a la media de los parámetros analizados.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Con el presente trabajo lo que se pretende es buscar nuevas técnicas estadísticas ya sea univariadas o multivariadas, para el tratamiento de información hidrometeorológica, pues es, en ese contexto, en el que formulamos un modelo de análisis de varianzas multivariadas que desde ya van a enriquecer nuestras investigaciones, porque todos los fe-

nómenos que existen en la naturaleza no existen solos por que sí, sino que siempre van a estar relacionados a distintos hechos o eventos y las conclusiones van a tener mayor relevancia cuando se consideran todas las variables inmersas en el problema.

- Al referirnos a la aplicación y solución del problema planteado, se llega a la conclusión de que al realizar un análisis en forma conjunta de toda la información de las variables planteadas, no va a existir diferencia significativa para poder afirmar la diferencia de información de una u otra estación. Es decir que ambas estaciones están registrando información meteorológica bien parecida, por lo menos considerando a tres variables meteorológicas calculadas, por ejemplo: la presión atmosférica diaria media proviene de realizar el promedio de la presión atmosférica a las 7:00, a las 13:00 y a las 19:00 hs, lo mismo para los otros dos parámetros.
- Se recomienda hacer un estudio de campo para demostrar que la información enviada por el IPEN tiene consistencia, es decir que el registro tanto de la estación convencional como de la automática vaya de acuerdo a lo estipulado en el convenio y sujeto a las normas de control de las áreas encargadas de validar la información.
- Existe información meteorológica obtenida visualmente como la visibilidad, nubosidad, temperatura del bulbo húmedo, meteoros de la zona (neblina, lluvia, etc), que no puede ser registrada por una estación automática. Se debe contar un personal que pueda efectuar estas observaciones para conocer la climatología de la zona, muy necesaria para futuros estudios.

BIBLIOGRAFIA

- Johnson, Richard; Wichern Dean. 1982. Applied multivariate statistical analysis. Prentice - Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Anderson, T. W. 1958. Introduction to multivariate statistical analysis. Wiley, New York, USA.
- Stevens, J.P. 1972. Four methods of analysing between variations for the k-Group MANOVA problem. *Multivariate Behavioral Research* 7 (October): 442-54.
- Valdivia Ponce, Jorge. 1977. Meteorología general. Dirección Universitaria de Biblioteca y Publicaciones de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- Hand, D. J.; Taylor, C.C. 1987. *Multivariate analysis of variance and repeated measures*. Chapman and Hall, London.

ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE PRONÓSTICOS DE DESCARGA Y VOLUMEN PARA LA CUENCA DEL RÍO RÍMAC

Luis Metzger Terrazas*

Centro de Predicción Numérica, SENAMHI, Jesús María, Lima

Theresa M. Carpenter y Konstantine Georgakakos

Hydrologic Research Center, San Diego, California, Estados Unidos

RESUMEN

Actualmente la tecnología ofrece herramientas útiles a los pronosticadores. Diversos modelos: del tiempo, clima, hidrológico, son empleados para realizar un mejor pronóstico; sin embargo, es necesario conocer la confiabilidad que determinado modelo puede ofrecer. Este reporte trata sobre la teoría del modelo hidrológico EHF y la metodología que se debe seguir para medir la confiabilidad de los pronósticos del modelo EHF.

1. INTRODUCCIÓN

La investigación y el trabajo desarrollado en este artículo fue realizado en el Centro de Investigación Hidrológica (HRC) en San Diego, California, dentro del marco del Proyecto Nacional "Mejoramiento de la Capacidad de Pronóstico y Evaluación del Fenómeno El Niño para la Prevención y Mitigación de Desastres en el Perú"; como parte de este Proyecto, personal del HRC en colaboración con personal del SENAMHI implementaron y calibraron tres modelos de pronóstico hidrológico para la cuenca del río Rímac, Perú.

El primer modelo implementado y calibrado fue el Sacramento (SAC) que toma en cuenta la humedad del suelo. El modelo SAC es un modelo conceptual lluvia escorrentía continuo que representa los varios almacenamientos de agua en el suelo (intercepción, humedad del suelo y almacenamiento en superficie) y flujos (evapotranspiración, infiltración, deshielo, interflujo, flujo base).

El segundo fue el modelo de Sistema de Pronóstico Hidrológico (HFS) para permitir la actualización en tiempo real de los contenidos de almacenamiento del modelo. Este modelo realiza pronósticos de caudales a corto plazo (hasta 3 días). La precipitación histórica observada es usada como información de entrada para el modelo HFS, mientras la precipitación pronosticada por el modelo meteorológico ETA, también corriendo operacionalmente en SENAMHI, constituye la información de entrada durante el periodo de pronóstico.

El tercer modelo implementado por el personal del HRC es el modelo de Pronóstico Hidrológico Conjunto (EHF). Este modelo genera pronósticos de caudal probabilístico a largo

plazo de hasta tres a cuatro meses en el futuro. EHF usa el modelo SAC así como un rango de precipitación futura probable y escenarios de evapotranspiración para producir caudales futuros probables.

Objetivos

- a. Medir la confiabilidad del modelo EHF para pronosticar la ocurrencia de caudales medios dentro de un predeterminado periodo futuro (ej: 30 días, 3 meses, etc.).
- b. Medir la confiabilidad del modelo EHF para pronosticar los extremos superior e inferior del volumen dentro de un periodo futuro predeterminado (7 días, 15 días, 30 días).

2. REVISIÓN DE LITERATURA

Modelo de pronóstico hidrológico conjunto (EHF)

El modelo EHF fue desarrollado en el HRC como una herramienta para obtener pronósticos de caudal a largo plazo. Este modelo usa componentes de modelos hidrológicos e hidráulicos conceptuales para pronosticar caudales futuros usando información meteorológica histórica, asumiendo que las series de tiempo de precipitación y evapotranspiración para las fechas del pronóstico, para cada uno de los años pasados, tiene igual posibilidad de ser observado durante el periodo futuro. El componente de modelo hidrológico del modelo EHF usa cada una de estas series de tiempo como entrada, con las mismas condiciones del suelo obtenidas por el modelo HFS para producir series de tiempo igualmente probables de caudales futuros para las fechas de pronóstico deseadas. El fundamento de la metodología del modelo EHF es la asunción de que eventos meteorológicos que ocurrieron en el pasado

* Ing. Mecánico de Fluidos, Centro de Predicción Numérica, SENAMHI.
e-mail: lmetzger@senamhi.gob.pe

son representativos de eventos que podrían ocurrir en el futuro.

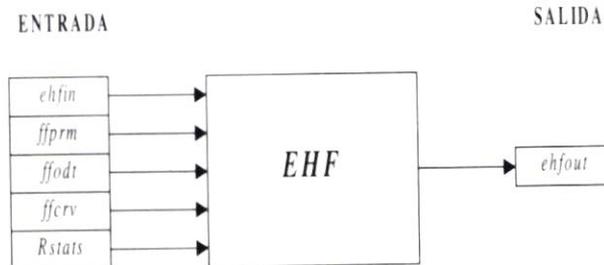


Figura 1. Muestra los archivos de entrada/salida.

3. MATERIALES Y METODOS

La información de entrada al modelo EHF fue proporcionada por SENAMHI. Esta consiste en caudales diarios observados, así como valores de precipitación y evapotranspiración para el periodo 1 de setiembre de 1988 al 31 de diciembre de 1998.

- a) *Caudales*.- Información de caudales promedios diarios fueron tomados de la estación en Chosica (ver figura 2).
- b) *Evapotranspiración*.- Basado en información de temperatura promedio, la evapotranspiración potencial

mensual fue estimada usando el método de Thornthwaite.

- c) *Precipitación Media Areal (MAP)*.- Fue estimada usando el programa MTNMAP, elaborado en Fortran, desarrollado por el HRC. Este programa es apropiado para calcular la MAP en cuencas con regiones montañosas. La MAP en la cuenca es calculada como el promedio de las estimaciones de precipitación de las grillas.

Como una necesidad el análisis de confiabilidad deberá considerar numerosos pronósticos EHF en lugar de examinar pronósticos individuales. Por esto, para producir información de entrada a los códigos de confiabilidad, el modelo EHF fue corrido cada 5 días desde el 6 de enero de 1989 hasta el 31 de diciembre de 1998, con una longitud de pronóstico de 90 días y una resolución de pronóstico diaria.



Figura 3. Archivos de entrada y salida requeridos para ejecutar el código para el Analisis de Confiabilidad de Descargas.

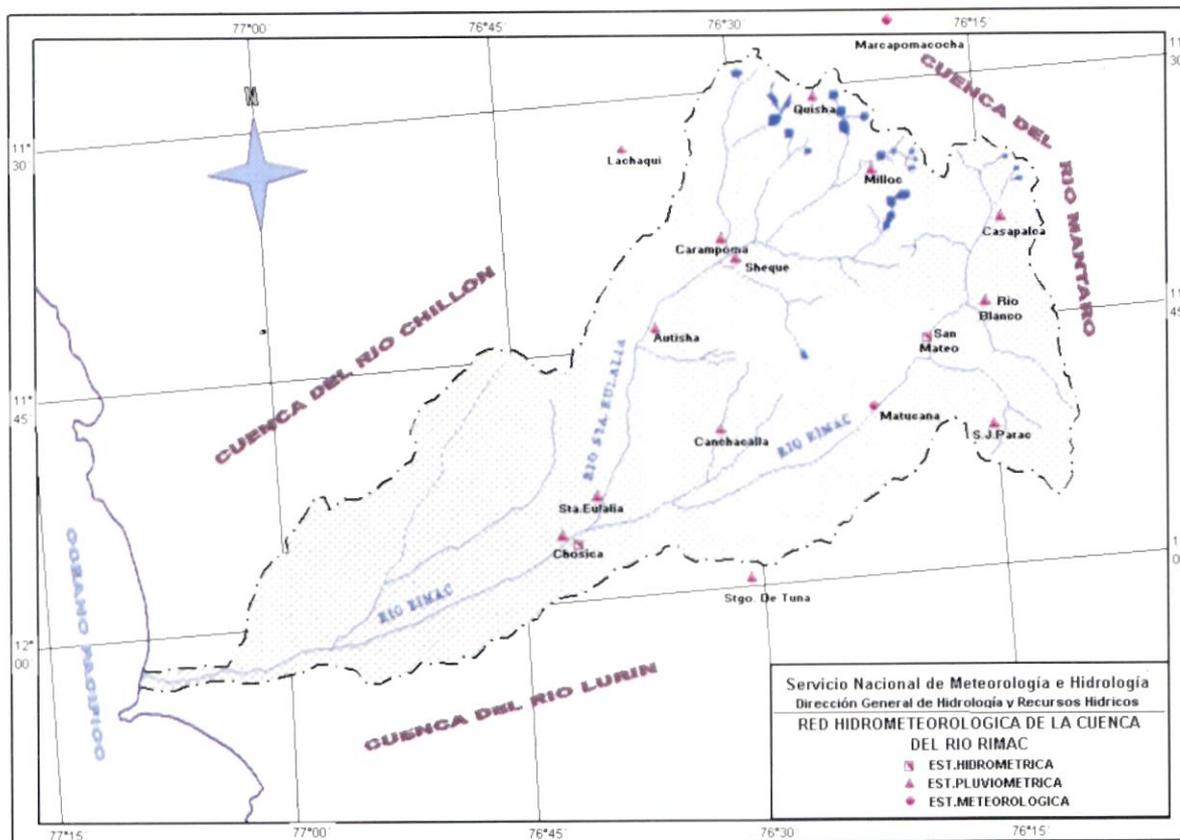


Figura 2. Cuenca del río Rímac mostrando estaciones de precipitación y la estación Chosica.

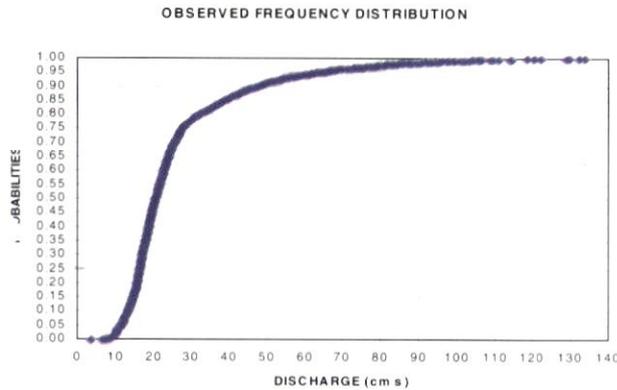


Figura 4. Distribución de Frecuencias de caudales históricos observados.

La figura 4 muestra que el caudal de 50 m³/s corresponde a un 92% de probabilidad de no excedencia. Asimismo, el caudal de 70 m³/s tiene un 96% de probabilidad de no excedencia y el caudal de 100 m³/s casi un 99% de probabilidad de no excedencia. Es por esto que históricamente sólo hay 1% de probabilidad de exceder un caudal diario de 100 m³/s.



Figura 5. Archivos de entrada y salida requeridos para ejecutar el código para el Análisis de Confiabilidad de los Volúmenes.

Así como en el análisis de los caudales límites, el código Fortran usa la información de entrada del archivo *ffodt* y calcula las frecuencias de pronóstico del evento dado, en este caso: pronostica el volumen de una duración dada en el tercil superior (inferior) para cada fecha de preparación del pronóstico en el archivo de salida del modelo EHF (*ehf90*). Estas frecuencias de pronóstico son almacenadas en el archivo *freqvol*; las frecuencias de pronóstico son agrupadas y las frecuencias observadas correspondientes de dicho evento son calculadas para las fechas de pronóstico dentro de cada grupo.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

Dos tipos de Análisis de Confiabilidad fueron realizados: uno para los caudales que exceden un cierto caudal límite en un período futuro dado, y otro para los volúmenes de una duración dada que exceden un valor de volumen límite dado.

El primer Análisis de Confiabilidad corresponde a caudales límites de 50, 70 y 100 m³/s, los cuales serán excedidos en los próximos 30, 60 y 90 días (ver tabla 1). La primera columna es para el rango de deciles de las frecuencias de pronóstico, la segunda es para el punto medio del rango de deciles, la tercera y cuarta son número de ocurrencias y la última es el porcentaje de ocurrencias. Específicamente la cuarta columna es el número de pronósticos emitidos para cada rango de decil, mientras la tercera es el número de casos entre el total de casos de la cuarta columna cuando el caudal límite fue excedido; idealmente los valores de la segunda y quinta columnas deberían coincidir.

Para un caudal de 50 m³/s, el modelo EHF generalmente produce pronósticos confiables de frecuencias en la mayor parte de los rangos de deciles con la excepción del rango 20-30% para un período futuro de 30 días (ver tabla 1 y figura 6), el rango de 20-40% para un período futuro de 60 días (no mostrado) y los rangos 10-20% y 30-40% para un período futuro de 90 días (no mostrado). Se observa también que muchos más pronósticos son emitidos para el rango de decil de 0-10% que para cualquier otro rango de decil examinado para todos los casos de períodos futuros.

Resultados análogos para los casos de caudales límites de 70 y 100 m³/s han sido obtenidos. Se observa que el rango del intervalo de confianza se amplía y se incrementa a medida que los valores de los caudales límites se incrementa. La tercera y cuarta columna de los cuadros revelan que esto es debido principalmente a la carencia de un número grande de información histórica para caudales que excedan esos límites. Un registro histórico mayor es necesario para evaluar definitivamente la confiabilidad del modelo EHF para estos caudales límites (especialmente para un caudal de 100 m³/s que es raramente excedido – menos de 1% de las veces – en la cuenca del río Rímac).

El segundo Análisis de Confiabilidad corresponde a las frecuencias de pronóstico de volúmenes de duraciones dados cuyos resultados son mostrados en la tabla 2 y las figuras 7 y 8; la tabla 2 muestra las frecuencias de pronóstico de ocurrencia en los terciles superior e inferior para un determinado volumen límite. La primera y segunda columnas de la tabla 2 muestran los rangos de deciles y sus puntos medios. La tercera y cuarta muestran el número de ocurrencias de las observaciones y pronósticos para cada decil en el tercil inferior, mientras la sexta y séptima muestran cantidades análogas para el tercil superior; los porcentajes del número de ocurrencias observadas y pronosticadas para los terciles superior e inferior son mostrados en la quinta y octava columnas.

Los valores en la cuarta y séptima columnas de la tabla 2 indican que la mayoría de los pronósticos fueron emitidos para los rangos de frecuencia de 0-30%, sin embargo se observa también que los resultados muestran que la longitud de registro es corta para tener conclusiones definitivas para los pronósticos en los rangos de deciles superiores (mayores a 50%) para todos los casos de las duraciones de volúmenes.

Los resultados de deciles en el rango de frecuencias de

Tabla 1. Análisis de confiabilidad de caudales a 30 días

[Q = m³/s]

| Intervalo (%) | Medio | F OBS | F PRON | Tasa (%) |
|---------------|-------|-------|--------|----------|
| 0 | 10 | 5 | 22 | 4,26 |
| 10 | 20 | 15 | 7 | 25,00 |
| 20 | 30 | 25 | 10 | 50,00 |
| 30 | 40 | 35 | 6 | 35,29 |
| 40 | 50 | 45 | 13 | 54,17 |
| 50 | 60 | 55 | 10 | 41,67 |
| 60 | 70 | 65 | 11 | 91,67 |
| 70 | 80 | 75 | 18 | 94,74 |
| 80 | 90 | 85 | 12 | 100,00 |
| 90 | 100 | 95 | 37 | 100,00 |

F OBS = Frecuencia Observada
 F PRON = Frecuencia Pronosticada

ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE CAUDALES A 30 DÍAS Q=50 m³/s

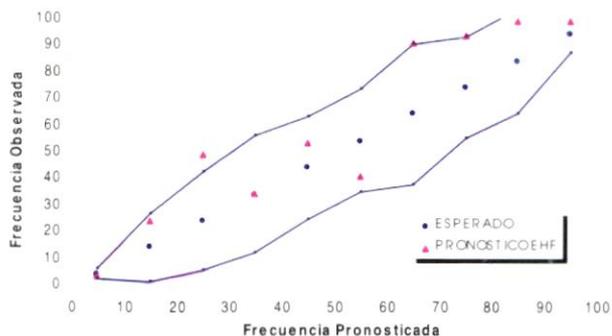


Figura 6. Diagrama de confiabilidad para un caudal límite de 50 m³/s.

Tabla 2. Análisis de Confiabilidad de volúmenes cada 7 días

| Intervalo (%) | Medio | F OBL | F FORL | Tasa_ Inferior (%) | F OBU | F FORU | Tasa_ Superior (%) |
|---------------|-------|-------|--------|--------------------|-------|--------|--------------------|
| 0 | 10 | 5 | 2 | 115 | 6 | 242 | 2.48 |
| 10 | 20 | 15 | 8 | 107 | 25 | 133 | 18,80 |
| 20 | 30 | 25 | 11 | 76 | 41 | 108 | 37,96 |
| 30 | 40 | 35 | 22 | 105 | 33 | 57 | 57,89 |
| 40 | 50 | 45 | 58 | 142 | 40 | 66 | 60,61 |
| 50 | 60 | 55 | 53 | 67 | 24 | 34 | 70,59 |
| 60 | 70 | 65 | 15 | 19 | 10 | 12 | 83,33 |
| 70 | 80 | 75 | 7 | 11 | 10 | 12 | 83,33 |
| 80 | 90 | 85 | 26 | 27 | 21 | 21 | 100,00 |
| 90 | 100 | 95 | 39 | 39 | 23 | 23 | 100,00 |

F OBL = Frecuencia Observada en el tercio inferior
 F FORL = Frecuencia Pronosticada en el tercio inferior
 F OBU = Frecuencia Observada en el tercio superior
 F FORU = Frecuencia Pronosticada en el tercio superior

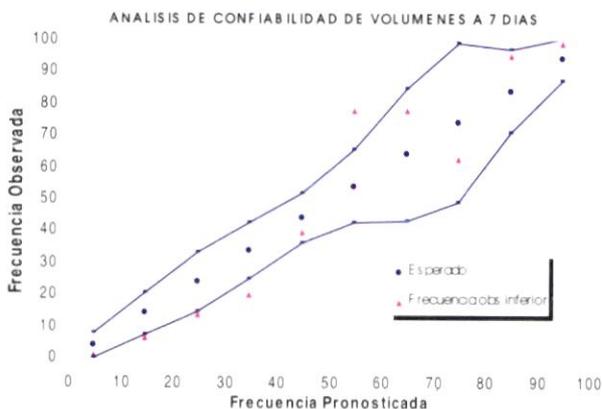


Figura 7. Diagrama de confiabilidad para un volumen límite en el tercio inferior.

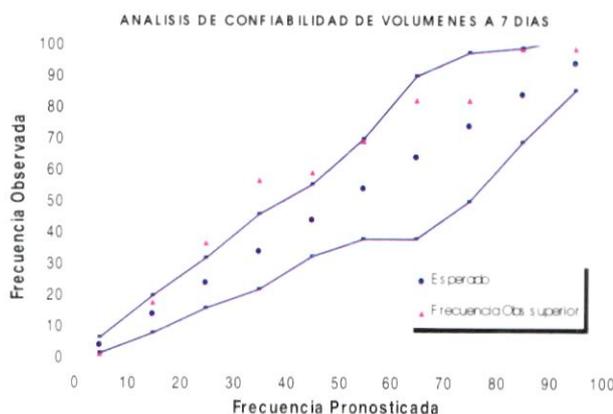


Figura 8. Diagrama de confiabilidad para un volumen límite en el tercio superior.

0-50% en la figura 7 muestran que, en general, los pronósticos conjuntos de volúmenes sobreestiman las frecuencias observadas para todos los casos de deciles en ese rango y para todos los casos de duraciones de volúmenes (7, 15 y 30 días). La figura 8 muestra la subestimación para el tercil superior del volumen límite.

En la tabla 2, por ejemplo, para el tercil inferior en el rango de deciles de 30-40% observamos que el modelo pronosticó 105 veces que no se excedería el volumen límite en el tercio inferior y los valores observados indicaron 22 veces no exceder dicho límite, entonces es claro que para este rango de deciles el modelo está sobreestimando los valores observados.

5. CONCLUSIONES

El Análisis de Confiabilidad del modelo de Pronóstico Hidrológico Conjunto (EHF) que pronostica frecuencias que exceden un caudal de 50 m³/s durante un período de tiempo establecido en el futuro, muestra que el modelo EHF produce probabilidades de pronóstico confiable consistentes para la mayor parte de los intervalos de frecuencias en el rango 0-80%, con un nivel de significancia del 5% y para períodos futuros de duración de 30-90 días. Los caudales límites mayores fueron excedidos sólo raramente en las observaciones y los resultados del análisis de confiabilidad son sólo considerados estables para el rango de pronóstico de deciles de 0-10%. En este rango de pronóstico de deciles, ellos muestran que el modelo EHF es confiable para todas las duraciones de período futuro para un caudal de 70 m³/s y sólo confiable para una duración futura de 90 días para un caudal de 100 m³/s. El modelo EHF muestra una tendencia a subestimar las frecuencias observadas (condicionado en el pronóstico que está siendo emitido) para los mayores caudales examinados (ej: 50 m³/s tiene una frecuencia de excedencia de 8%).

El Análisis de Confiabilidad de la frecuencia de pronóstico de ocurrencia de volúmenes mayores que el superior (menores que el inferior) tercil de su distribución observada, muestra

una tendencia a subestimar (sobreestimar) las frecuencias observadas. Los resultados sobre la base del registro histórico muestran confiabilidad para el rango de frecuencias de 0-50%, para el cual suficientes pronósticos fueron emitidos. El carácter de los resultados no cambia apreciablemente para duraciones de volúmenes en el rango de 7-30 días.

6. RECOMENDACIONES

- Repetir el Análisis de Validación de eventos diferentes que son de relevancia a los usuarios de los pronósticos EHF del SENAMHI.
- Repetir la Validación de los pronósticos conjuntos EHF en SENAMHI después de algún tiempo, cuando más información haya sido acumulada, para permitir mayor confianza en los resultados correspondientes a los deciles de frecuencia de pronóstico alto para los eventos extremos.
- Repetir el Análisis de Validación para los casos cuando los modelos hidrológicos básicos sean modificados (cambio de parámetros o cambios significantes en los datos de entrada de precipitación al modelo) y para otras cuencas.

BIBLIOGRAFIA

- Bae, D.H. y Georgakakos K.P. 1994. Climatic variability of soil water in the American Midwest. I, Hydrologic modeling. *J. Hydrology*, 162, 355-377.
- Bras, R.L. 1990, *Hydrology: An Introduction to hydrologic Science*. Addison-Wesley, New York, 643 pp.
- Carpenter, T.M. y Georgakakos K.P. 2001. Assessment of Folsom Lake response to historical and potentia future climate change scenarios. I, Forecasting. *J. Hydrology*, in press.
- Day, G.N. 1985. Extended streamflow forecasting using NWSRFS. *J. Water Resources Planning and Management III*(2), 157-170.
- Georgakakos, K.P.; Georgakakos, A.P.; Graham N.E. 1988. Assessment of benefits of climate forecasts for reservoir management in the GCIP region. *GEWEX News*, 8(3), 5-7.

ANÁLISIS DE LAS RESPUESTAS DEL MODELO CCM3 EN EL PERÚ A LA TSM DEL AÑO 2000

Mauricio Carrillo Cruz* y Delia Acuña Azarte
Centro de Predicción Numérica, SENAMHI, Jesús María, Lima

RESUMEN

Se analiza la simulación del modelo CCM3 con tres diferentes condiciones de contorno en la frontera inferior en contacto con el océano: Temperatura Superficial del Mar (TSM) climática, TSM observada y TSM pronosticada del año 2000, para lo cual se comparan las predicciones de precipitación con valores analizados del Climate Prediction Center (CPC) de los Estados Unidos, de enero a setiembre del 2000. La comparación de los valores analizados del CPC y las respuestas del modelo con las diferentes TSM dan valores favorables (anomalías entre -1 a 1 mm/día) en la región de la costa y sierra para el período seco analizado (julio, 2000), en tanto que en la amazonía la performance no es buena. Para el período lluvioso analizado (febrero, 2000) la amazonía es la mejor simulada en los tres casos, presentando anomalías positivas hasta 5 mm/día lo que se verifica con los analizados del CPC.

1. INTRODUCCIÓN

El Community Climate Model (CCM3) es un modelo global climático, que se encuentra en fase experimental en el Centro de Predicción Numérica (CPN) del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI); su implementación se inició en noviembre del 2000 obteniéndose corridas de prueba a seis y nueve meses.

La existencia del modelo dinámico CCM3 y la falta de un experimento que nos permita ver la confiabilidad de la predicción de precipitación sobre el territorio peruano, condujo a realizar tres simulaciones con diferentes condiciones de contorno para conocer la performance del modelo y de esta manera mejorar la capacidad de pronóstico del clima, siendo éste el objetivo del presente experimento.

A priori se podría suponer que usando valores de TSM observados la respuesta del modelo debería ser mejor, ya que los valores de contorno introducidos son cuasi-reales.

Descripción del Modelo

El modelo CCM3 es derivado del modelo espectral australiano y del European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), versión adiabática no viscosa, siendo la versión original el Modelo CCM0A (Washington, 1982) y el CCM0B (Williamson et al., 1983) desarrollado en la División Climática y Global (CGD) del National Center for Atmospheric Research (NCAR). La nueva versión CCM3 presenta modificaciones sustanciales en el tratamiento de la difusión vertical, radiación, interacción nube-radiación y la mejora en los procesos en superficie (Land-surface).

Representación horizontal

El CCM3 emplea una resolución espectral horizontal T42, de aproximadamente 2,8 x 2,8 grados en transformada de grilla.

Representación vertical

Usa la coordenada híbrida vertical (sigma-presión), donde las regiones más bajas de la atmósfera son discretizadas por la coordenada sigma pura. Los niveles intermedios usan la discretización vertical híbrida sigma-presión, en tanto que los niveles altos usan la discretización sólo con la presión.

El modelo considera 18 niveles verticales, un tope rígido a 2,917 hPa y uno superficial a 1000 hPa.

Inicialización

La componente atmosférica requiere condiciones iniciales de la atmósfera y condiciones de frontera de ozono; para los diferentes niveles verticales se requiere datos iniciales de temperatura, humedad específica, vapor de agua, viento zonal y meridional, en tanto que para un solo nivel requiere: superficie geopotencial, presión superficial, desviación estándar de la altura geopotencial, datos indicadores de orografía y temperatura sub-superficial de suelo para 4 niveles.

La componente oceánica puede establecerse de dos maneras: puede ser definida como un Data Ocean Model (DOM), el que requiere datos iniciales de temperatura superficial del mar, o definirse como Slab Ocean Model (SOM), en el cual el modelo calcula TSM.

Esquema del tiempo de Integración

El tiempo de integración es realizado según el esquema

* Lic. en Física, Centro de Predicción Numérica, SENAMHI.
e-mail: mcarrillo@senamhi.gob.pe

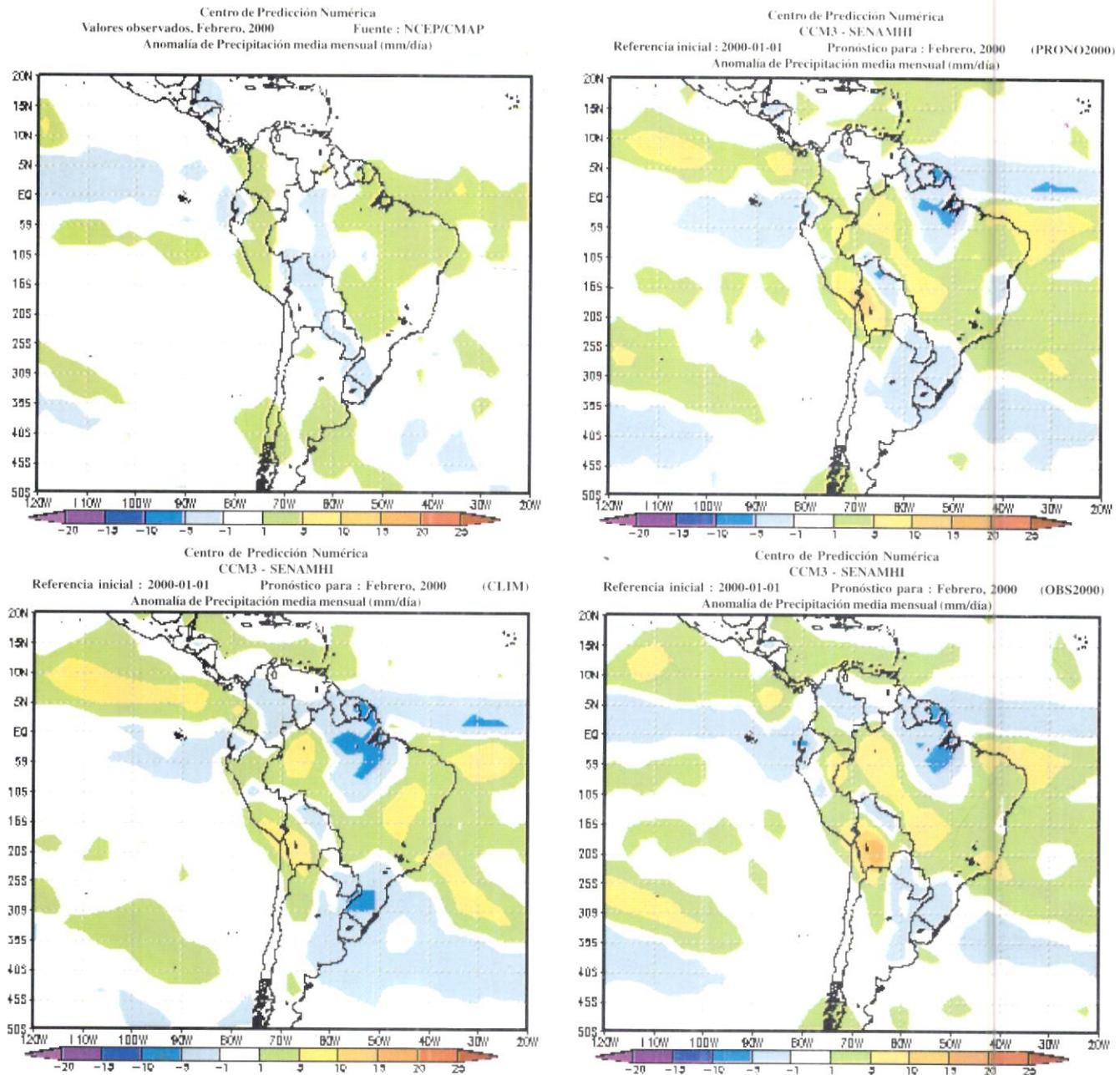


Figura 1. Simulación de la precipitación (febrero, 2000) con diferentes condiciones de TSM

semi-implícito de leap frog.

2. METODOLOGÍA

La idea básica de esta metodología es la simulación numérica de tres condiciones de contorno. Así, para el primero se usaron medias mensuales climáticas de TSM (CLIM), para el segundo valores observados de TSM (OBS2000) y para el tercer modo, valores pronosticados de TSM (PRONO2000).

Los datos de TSM para CLIM fueron usados de la base de datos de Shea, Trenberth, Reynolds (Kluzek et al., 1996); los datos de TSM para OBS2000 son valores mensuales analizados de Optimal Interpolation Reynolds (Reynolds, 1988), pro-

porcionados por National Center for Environmental Prediction (NCEP); y los datos de TSM para PRONO2000 son las predicciones del modelo acoplado Océano-Atmósfera (Ming, Ji et al, 1997) del NCEP (Climate Modeling Branch).

Con estos datos se realizó la simulación en un ordenador DEC Alpha ES40 usando un procesador, el cual demandó un gasto computacional de 10 horas por simulación.

Una vez obtenidas las corridas, se tomó la variable precipitación total (precipitación convectiva más la precipitación a gran escala) y se obtuvo las anomalías correspondientes usando la base de datos del Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation (CMAP), preparados por Xie, del NCEP/CPC (Xie and Arkin, 1997), con los que se preparó una

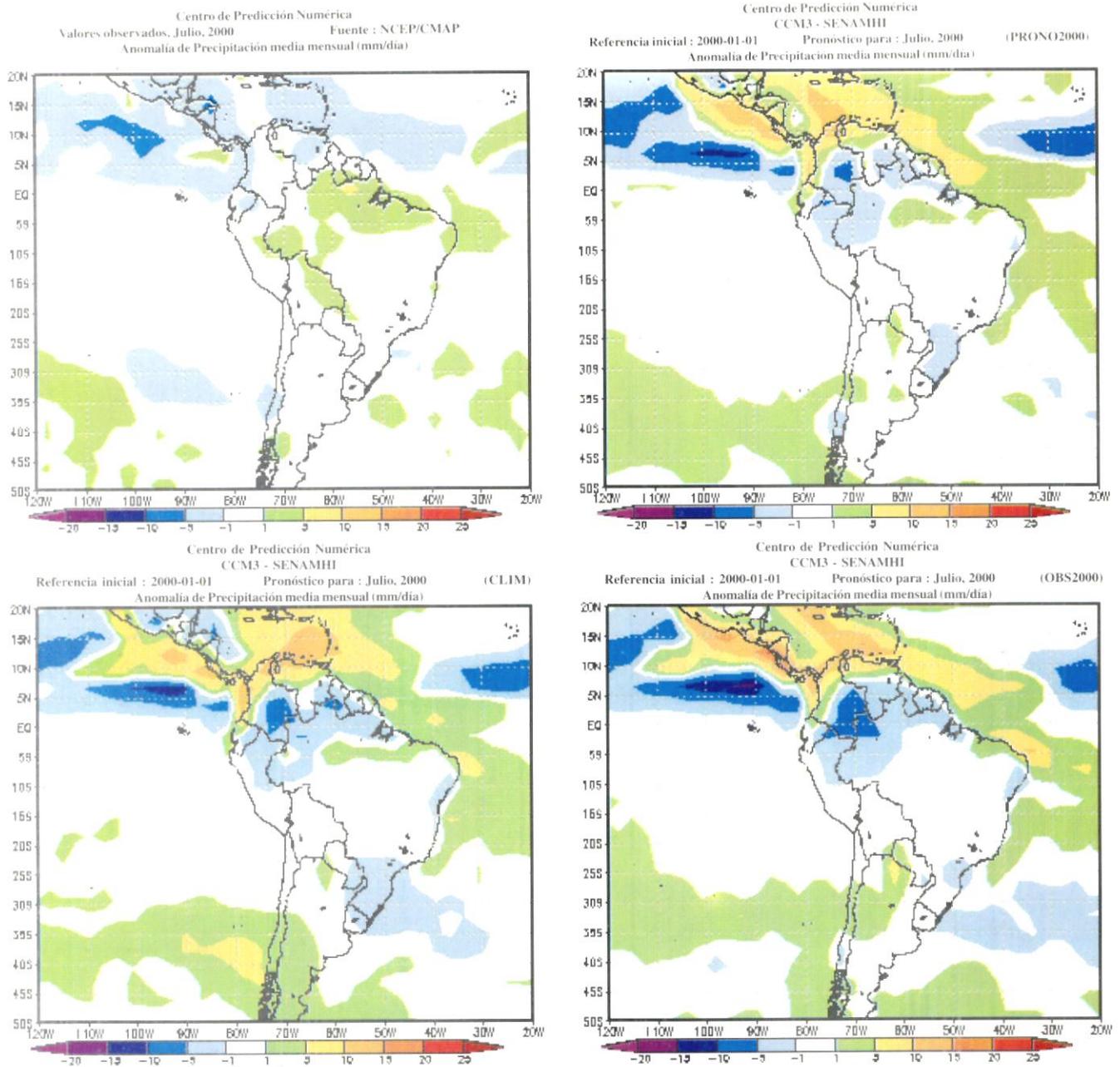


Figura 2. Simulación de la precipitación (julio, 2000) con diferentes condiciones de TSM

climatología del período 1979-1998.

El siguiente paso fue analizar el comportamiento de las anomalías de precipitación durante febrero del 2000 (mes donde se totalizan las mayores precipitaciones, principalmente en la sierra) y el mes de julio del 2000 (mes representativo del período seco).

3. RESULTADOS

Concluido el experimento se presentan los resultados obtenidos:

En el período lluvioso (febrero, 2000), la condición PRONO2000 verifica el régimen de anomalías de precipitación

observada en la costa norte, mientras que OBS2000 subestima hasta en 5 mm/día.

En la región central del territorio peruano se observa un núcleo de anomalías negativas con rangos entre -5 y -1 mm/día en todos los casos; como se muestra en la figura 1, los valores observados no verifican esta anomalía. Al presentar los tres casos esta tendencia, habría que tomar en cuenta la parametrización física en esta zona y analizar el por qué de esta persistencia, lo que probablemente tenga que ver con el esquema de parametrización de la convección.

En la costa sur (Ica-Arequipa) se observa para PRONO2000 y OBS2000 anomalías hasta 5 mm/día que se verifica con lo observado; debe notarse que CLIM también

presenta esta tendencia.

Los valores de anomalías de precipitación simulados con las tres diferentes condiciones de contorno nos indican un núcleo de anomalías positivas de 5 a 15 mm/día en el extremo sur del país (Moquegua-Tacna), que difiere de las anomalías observadas para el mes analizado, lo que nos hace suponer que el modelo no resuelve bien las complejidades topográficas de los Andes y por tanto el efecto de este factor sobre la circulación de la atmósfera, debido tal vez al uso de coordenadas híbridas. Estos resultados no son definitivos, pues el Boletín de SENAMHI¹ presenta anomalías positivas en la zona, comparables también a los inferidos de anomalías de radiación de onda larga [Outgoing Longwave Radiation (OLR)] reportados en el Climate Diagnostics Bulletin².

En la amazonía norte el comportamiento de la precipitación es bueno con las tres simulaciones, siendo mejor con OBS2000 y PRONO2000 ya que se ajustan a las anomalías observadas, lo que verifica en parte nuestra hipótesis inicial.

En el período seco (julio/00), la comparación de los valores analizados del CPC y las respuestas del modelo con las diferentes TSM nos muestran valores similares (anomalías entre -1 a 1 mm/día) en la región de la costa y sierra del país, en tanto que en la amazonía la performance no es buena ya que los tres modos subestiman las lluvias hasta en 5 mm/día (ver Figura 2).

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados son una muestra contraria de la hipótesis inicial, pero si bien es cierto hubieron algunos resultados desconcertantes, algunos se pudieron explicar y otros quedarán para trabajos futuros.

La respuesta del modelo ante nuestra hipótesis inicial no es del todo correcta, posiblemente debido al diseño del esquema de la convección, principalmente.

Los tres casos de predicción han ayudado a comprender cómo el modelo CCM3 hace la predicción del régimen de precipitación en nuestro territorio, en algunos casos con resultados buenos como en la costa y sierra del país en época seca (julio), que hace suponer que el diseño del sistema es correcto, y otros con resultados no esperados como la persistencia a sobrestimar las lluvias sobre la región sur andina (Altiplano), que plantean la necesidad de continuar con los experimentos. En estos casos una solución dinámica estadística puede llevar a una validación satisfactoria.

Partiendo que el modelo está diseñado para realizar o simular lo que se le pida, se puede afirmar que hay algunas tendencias a reproducir los mismos efectos en las predicciones, las que no se alteran en gran medida cuando se introduce diferentes condiciones de contorno al modelo. Es así que el modelo CCM3 nos proporciona información de las áreas donde

hay una persistencia a reproducir los mismos efectos en las predicciones, es decir, áreas en las que el modelo demuestra ser poco sensible a las variaciones de TSM, y mostrar la misma tendencia aun cuando nuestros valores pronosticados sean los más acertados.

¿Qué ocurre cuando le decimos al modelo que trabaje con valores pronosticados? La respuesta del modelo no sólo es debida al diseño del sistema, aquí también tiene que vencer la incertidumbre de los valores de TSM introducidos. Debemos notar que en algunos casos las predicciones con PRONO2000 y OBS2000 no difieren en gran medida, lo que hace suponer que estos valores son bastante coherentes.

Otro punto analizado son las zonas donde el modelo proporciona una tendencia similar frente a diferentes condiciones de contorno; esto es importante porque proporciona información de zonas donde el modelo tiene la misma persistencia en la predicción, es decir, zonas en donde el modelo demuestra ser poco sensible a las variaciones de TSM, y muestra la misma tendencia aun cuando las condiciones de contorno fueran muy diferentes.

Aun cuando no se pueden generalizar estos resultados, porque sólo se han realizado tres experimentos, queda pendiente hacer más simulaciones que llevarán a la mejor comprensión de estos detalles; la solución a algunos problemas será acoplar un modelo regional al modelo CCM3, lo que permitiría simular fenómenos de pequeña escala que no están definidos en su dinámica.

BIBLIOGRAFIA

Kiehl, Jeffrey; Hack, James; Bonan, Gordon; Boville, Byron; Briegleb, Bruce; Williamson, David; Rasch, Philip. 1996. Description of the NCAR Community Model (CCM3). NCAR Technical Note, Boulder, Colorado, 152 pp.

Kluzek, Erik B; Olson, Jerry; Rosinski, James; Truesdale, Jhon; Vertenstein, Mariana. 1996. User's guide to NCAR CCM3.6. Boulder, Colorado, 147 pp.

Ming, Ji; Arun, Kumar and Ants, Leetmaa. 1997. Forecasts of tropical pacific SST using a comprehensive coupled ocean-atmospheric dynamical model. CPC Experimental Bulletin, December.

NOAA. 2000. Climate Diagnostics Bulletin, 2.

Reynolds, R. W. 1988. A real-time global sea surface temperature analysis. J. Climate, 1: 75-86.

SENAMHI, Dirección de Climatología. 2000. Boletín Monitoreo y Análisis Climático, 6(2).

Washington, W. M. 1982. Documentation for the Community Climate Model (CCM), version 0. NCARD Report, Boulder, Colorado.

Williamson, D.L. 1983. Description of NCAR Community Climate Model (CCM0B). NCAR Technical Note NCAR/TN-210+STR, Boulder, Colorado, 88 pp.

Xie, P.; Arkin, P.A. 1996. Analyses of global monthly precipitation using gauge observations, satellite estimates, and numerical model predictions. JCL, 9: 840-858.

Xie, P.; Arkin, P.A., 1997. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates and numerical model outputs. BAMS, 78: 2539-2558.

¹ Boletín Monitoreo y Análisis Climático, febrero 2000.

² Climate Diagnostics Bulletin, February, 2000.

PRONOSTICO DE NIEBLAS EN LA COSTA DE PERU: CASO ESTUDIO FEBRERO 1999

Angel G. Cornejo G.* y Juan Coronado L.
Centro de Predicción Numérica, SENAMHI, Jesús María, Lima

RESUMEN

Un severo evento de niebla que se presentó principalmente en el aeropuerto de Arequipa y con menor intensidad en el de Lima-Callao durante febrero de 1999 es estudiado con análisis meteorológicos de macro escala producidos por el Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP). Dicha información sirve de entrada para el procesamiento de un modelo regional RAMS que produce datos atmosféricos con mayores detalles que los provenientes del NCEP.

Del estudio de los productos de ambos modelos se identifica que advección fría entre 1 000 y 1 500 metros sobre el nivel del mar (msnm) podría ser un factor importante para la presencia de nieblas en la costa de Perú. Sin embargo la existencia de advección fría durante los días de niebla podría ser pura coincidencia, por lo que es indispensable identificar su rol dentro de los mecanismos físicos responsables de su presencia.

Se plantea la hipótesis de que el elemento principal de las nieblas es la presencia de vientos del oeste en niveles cercanos a la superficie terrestre. Esos vientos producen advección fría en asociación con un gradiente de temperaturas adecuado para intensificar la inversión térmica.

Asimismo esos vientos producen un aumento continuo de humedad atmosférica cerca de los aeropuertos al transportar aire húmedo marino hacia continente. La humedad queda atrapada en niveles bajos al no poder atravesar la inversión térmica ni tampoco poder dispersarse hacia el Este por la presencia de la Cordillera de los Andes. La resultante es la disminución de visibilidad por el aumento de humedad.

1. INTRODUCCION

Eventualmente se presentan en la costa de Perú severos episodios de nieblas que afectan la aeronavegación al reducir significativamente la visibilidad. Uno de esos eventos ha sido estudiado mediante el análisis de información meteorológica que a escala global emite rutinariamente el Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP) de los Estados Unidos de América. La información atmosférica consiste en datos de las diferentes variables meteorológicas en puntos de una red.

Sin embargo, esa información con datos en una red de 2,5 x 2,5 grados de longitud y latitud, equivale a tener datos meteorológicos aproximadamente cada 200 km. Para darnos una idea de lo que ello implica, supongamos que un dato del análisis se ubicara en el centro de Lima, entonces el siguiente punto recién estaría más allá de Cañete. Obviamente tal información no permite proporcionar detalles de los cambios de pequeña escala que pudieran ocurrir en el área. Sin embargo su función es muy útil, ya que proporciona información de gran o macro escala.

Quizás un ejemplo podría ilustrar lo relativo a las diferentes escalas del análisis. Consideremos la situación atmosférica de un pequeño valle con dimensiones del orden de los 0,5 km.

Supongamos que uno de los puntos de la red de macro escala se ubicara en un lugar dentro del valle, entonces los siguientes puntos no podrán ubicarse en el valle ya que la distancia de la red es del orden de los 200 km y el valle sólo mide alrededor de 0,5 km. Con solo un punto en el valle, no es suficiente para describir detalles de los cambios atmosféricos dentro de él. En otros valles es posible que ningún punto de la red de macro escala se ubique en su interior por lo que no se podría describir sus cambios ambientales.

Sin embargo, existe software que a base de la información de macro escala permite obtener detalles de menor escala. En términos del ejemplo del párrafo anterior los detalles meteorológicos del valle podrían ser determinados en base a la información de macro escala que alimenta a un sistema de ecuaciones físico-matemáticas que representa el comportamiento de la atmósfera.

Uno de esos programas es el "Sistema Regional de Modelamiento Atmosférico" (RAMS) desarrollado en la Universidad de Colorado de los Estados Unidos y que está siendo utilizado con éxito en diferentes partes del mundo. El Centro de Predicción Numérica del SENAMHI-Perú cuenta actualmente con este software.

Podría pensarse que la función del RAMS es interpolar estadísticamente la información de macro escala para obtener la correspondiente a la de menor escala. Ese no es el caso, ya que la interpolación es física en el sentido de que se obtiene la información de mayor resolución mediante el procesamiento

* MSc. en Meteorología, Centro de Predicción Numérica, SENAMHI.
e-mail: acornejo@senamhi.gob.pe

de un programa de cómputo que toma en cuenta las leyes físicas de la atmósfera.

El análisis del caso severo de niebla se desarrolló en dos escalas de información, primero la correspondiente a la macro escala, capaz de proporcionar el comportamiento de variables atmosféricas que por razonamientos físicos se espera que estén asociadas con la presencia de nieblas.

En segundo lugar se procesa el modelo RAMS en una región que incluya la costa de Perú, pero con una resolución de 65 km. Eso indica que entre Lima y Cañete habrían datos aproximadamente en tres lugares pudiendo obtener información con mayor detalle de los cambios atmosféricos en esa zona.

En el contexto del análisis de las nieblas, esperamos que permita informar sobre zonas con mayor o menor intensidad, en función de la dirección prevaleciente del viento en interacción con la orografía de la región.

Objetivos

Concretamente los objetivos del presente estudio son los siguientes:

- a. Identificar los mecanismos físicos responsables de la presencia de nieblas en los aeropuertos de Lima-Callao y Arequipa.
- b. Identificar los parámetros meteorológicos que permitan pronosticar la presencia de severas nieblas en los aeropuertos mencionados.

Artículos sobre nieblas no son muy abundantes en la literatura científica. Sin embargo la nubosidad tipo estratos en la costa de América del Norte parece estar relacionada con advección de temperatura en superficie de acuerdo a Wylie et al. (1989). Una conclusión similar se obtiene en el presente estudio con respecto a las nieblas.

Este trabajo se ubica dentro de un estudio integral de las nieblas en la costa de Perú. Se están analizando los casos ocurridos en los años 1998 y 1999, así como los que se están presentando continuamente en el actual año. Los resultados del actual análisis permiten establecer la hipótesis de trabajo de nieblas en la costa de Perú.

Adicionalmente se está analizando información relevante proporcionada por satélites. Diferentes artículos sobre el tema están siendo considerados, por ejemplo Lee et al. (1997) discute la potencialidad para que productos del Satélite GOES en onda corta de 3,9 m y onda larga 10,7 um puedan proporcionar datos útiles sobre el movimiento y evolución de nubes bajas y estratiformes. Las técnicas enfocan los varios problemas que encaran pronosticadores operacionales en el análisis de nubes bajas.

2. MATERIALES Y METODOS

El caso estudio escogido corresponde al 15 de febrero de

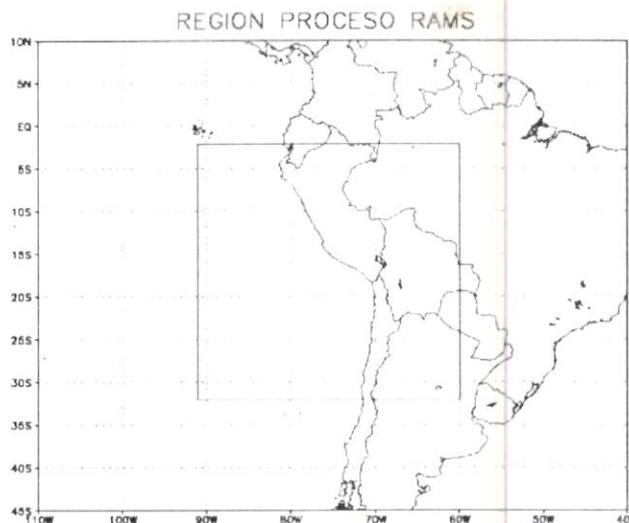


Figura. 1. Zonas de estudio. El área mayor corresponde al análisis de macro escala, mientras que la zona menor es la del modelo regional RAMS.

1999. Para identificar los mecanismos responsables se procesó el modelo RAMS con las condiciones iniciales del 12 de febrero durante un periodo de 96 horas.

Para ello es necesario disponer de las condiciones atmosféricas no sólo del día 12 de febrero, sino también de los siguientes días hasta por 96 horas. Tal información ha sido obtenida de los análisis atmosféricos producidos por el NCEP (Centro Nacional de Predicción Ambiental) de los Estados Unidos con una resolución (distancia entre puntos de la red) de 2,5 grados de longitud y latitud, significando que los datos se disponen cada 2,5 grados tanto de longitud como de latitud. Un primer diagnóstico del fenómeno es realizado utilizando sólo esta información en un dominio que cubre toda América del Sur en lo que constituye un macro análisis.

Posteriormente, un análisis de mayor resolución se realiza después de procesar el modelo RAMS pero en un dominio mas pequeño G1 (figura 1). La región G1 tiene una resolución de 65 km con los siguientes límites:

92,4° W - 61,98° W
31,7° S - 1,83° S

Información respecto a visibilidad en el Aeropuerto Internacional de Lima y Callao y de Arequipa fue recopilada de la información Metar y Sinóptica correspondiente.

3. ANALISIS

a) Macro escala

Para verificar los productos producidos por el procesamiento del modelo RAMS comparamos los vientos producidos por él, a un nivel de aproximadamente 12 000 m sobre el nivel del mar, con aquellos obtenidos del análisis de

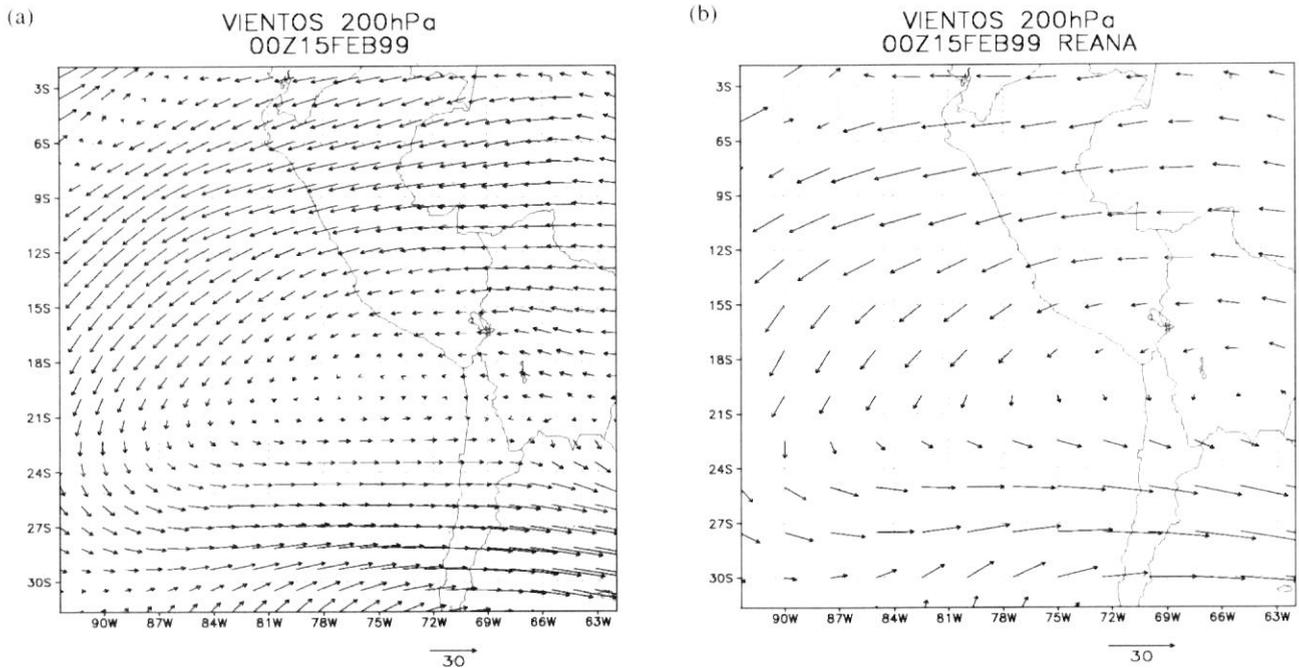


Figura 2. Mapas de Vientos a 200 hPa producidos por: (a) Modelo RAMS (análisis regional). (b) Reanálisis (Macro escala).

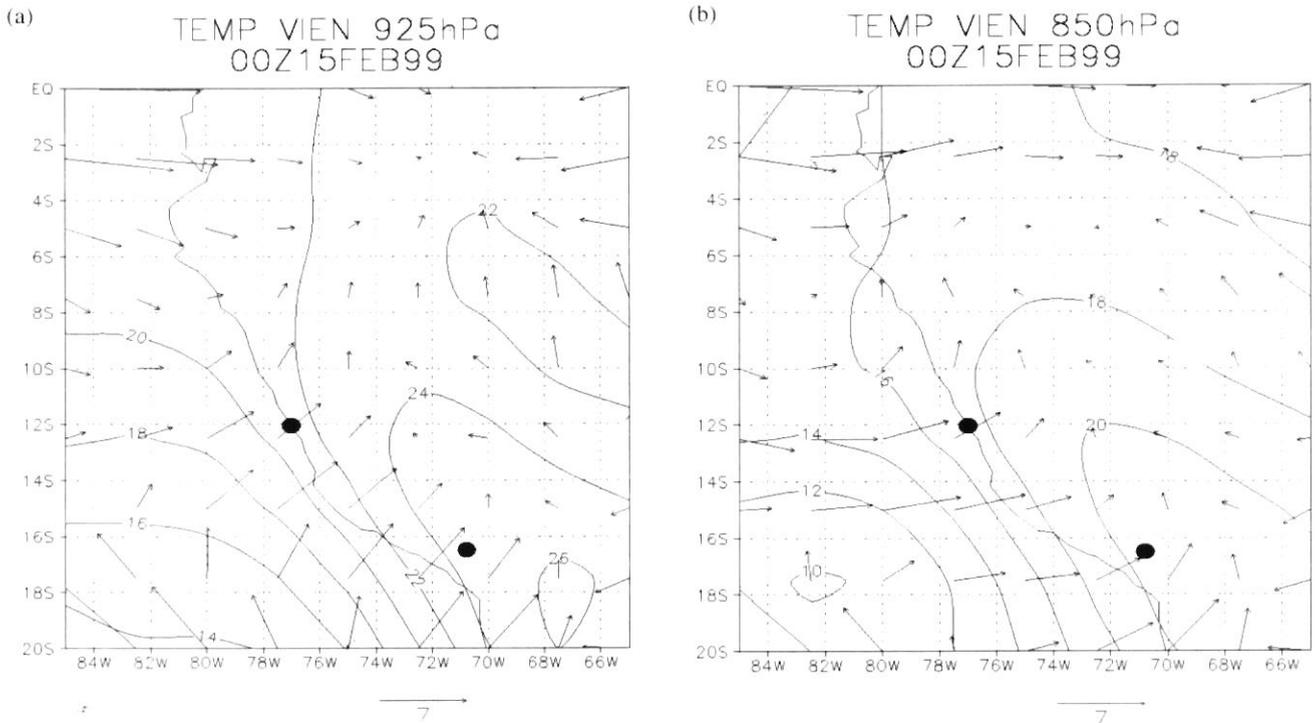


Figura 3. Mapas de Vientos y Temperaturas 15 de febrero de 1999 00Z: (a) 925 hPa. (b) 850 hPa producidas por Reanálisis (Macro escala). Puntos negros indican ubicación de aeropuertos de Lima-Callao y Arequipa.

macro escala emitidos por NCEP, los cuales usamos como referencia.

A ese nivel, alejado de las montañas de la Cordillera de los Andes, ambos productos deben ser semejantes, si es que el modelo RAMS produce resultados confiables. A otros niveles más cercanos a las montañas, los parámetros meteorológicos

producidos por ambos modelos (RAMS y NCEP) no necesariamente deben ser semejantes debido a que RAMS proporciona mayor detalle, el cual no se incluye en los análisis del NCEP.

En la figura 2a se muestran los vientos a nivel de 200 hPa (aproximadamente 12 km de altura) producidos por el modelo

RAMS. Nótese la presencia de vientos provenientes del Este (Oeste) al norte (sur) de 18°S configurando una circulación antihoraria denominada anticiclónica.

En la figura 2b se presenta la misma variable proporcionada por NCEP (conocida como Reanálisis). Nótese que los puntos donde se dibujan las flechas de los vientos están más espaciados que los correspondientes a los de la figura 2a producido por el RAMS, indicando que este último produce mayor detalle de información.

Ambos campos tienen un patrón similar sugiriendo que el modelo RAMS produce una información confiable.

La figura 3 presenta el análisis de macro escala (NCEP) de vientos y temperatura en niveles cercanos a la superficie terrestre. Un prominente aspecto es la presencia de vientos cruzando casi perpendicularmente las isotermas de menor a mayor temperatura configurando lo que se conoce como advección fría. Ella es de mayor intensidad encima de Arequipa que sobre Lima-Callao y es tan intensa a 975 hPa como a 850 hPa.

Habiendo identificado el parámetro advección fría en niveles bajos como un posible factor para la ocurrencia de severas nieblas, se tienen que establecer los mecanismos físicos responsables y determinar el rol que pudiera tener la advección fría en dichos mecanismos.

Se plantea la hipótesis de que intensas advecciones frías entre 1 000 y 15 00 msnm podrían haber producido un incremento en los movimientos verticales de subsidencia con un consecuente incremento de la intensidad de la inversión térmica. El resultado es la inhibición de movimientos verticales de partículas cercanas a la superficie hacia mayores elevaciones. De esta manera las partículas por debajo de la inversión térmica quedan atrapadas en esos niveles.

En una niebla esas partículas atrapadas son las que corresponden al vapor de agua, las que cuando llegan a tener una concentración significativa pueden reducir la visibilidad. Para ello el otro elemento importante en los mecanismos de producción de nieblas es la presencia de vientos provenientes del Oeste en niveles cercanos a la superficie terrestre, que son los responsables del transporte de humedad hacia continente.

En resumen en una niebla típica vientos del Oeste en niveles por debajo de la inversión térmica son muy persistentes para producir intensos transportes de aire húmedo provenientes del mar hacia continente. Allí, la humedad se incrementa ya que dicha masa de aire no puede dispersarse ni vertical ni horizontalmente por la presencia de la inversión térmica y de la Cordillera de los Andes al Este. El resultado final es la disminución de la visibilidad.

Se plantea la hipótesis de que las variables atmosféricas más directamente asociadas con la presencia de nieblas son la temperatura y los vientos en niveles cercanos a la superficie terrestre. La figura 3 presenta dichas variables en los niveles de 925 y 850 hPa correspondientes aproximadamente a 900 y 1 500 m de elevación.

Las figuras 3a y 3b configuran la presencia de significativas advecciones frías con mayor intensidad en Arequipa que en

Tabla 1.

Visibilidad en Lima-Callao

| Fecha | Visibilidad |
|------------|-------------|
| 1999-02-15 | 800 m |

Visibilidad en Arequipa

| Fecha | Hora UTC | Visibilidad |
|------------|----------|-------------|
| Febrero 03 | 09 | 200 m |
| 04 | 22 | 1 500 |
| 05 | 23 | 00 |
| 06 | 00 | 00 |
| 06 | 22 | 1 300 |
| 07 | 03 | 2 000 |
| 07 | 10 | 500 |
| 07 | 21 | 1 500 |
| 07 | 22 | 1 500 |
| 14 | 22 | 00 |
| 14 | 23 | 00 |
| 15 | 00 | 100 |
| 15 | 08 | 00 |
| 16 | 00 | 00 |
| 16 | 02 | 00 |
| 16 | 11 | 00 |
| 17 | 00 | 100 |
| 17 | 01 | 100 |
| 17 | 02 | 100 |
| 17 | 03 | 100 |

Lima, lo cual es coherente con la menor severidad de la niebla en la última estación, tal como se muestra en la tabla 1.

Adicionalmente, vientos de componente Oeste provenientes del mar en niveles bajos son capaces de proveer significativa convergencia de humedad debido a la presencia de la orografía.

La resultante de los mecanismos descritos en los párrafos anteriores es la presencia de una severa niebla, con mayor intensidad en Arequipa por la mayor intensidad de advección fría en la zona.

b) Regional

Para el análisis regional se procesó el modelo RAMS en la zona mostrada en la figura 1 que incluye toda la costa de Perú.

La figura 4 presenta los resultados de procesar el modelo RAMS en la región ubicada sobre el aeropuerto de Lima-Callao. Puede apreciarse que sólo a nivel de 925 hPa (figura 4a) se observa intensa advección fría ya que a 850 hPa ella es de menor intensidad (figura 4b). Ello contrasta con los resultados correspondientes a Arequipa (figura 5) en que en ambos niveles se tienen substanciales advecciones frías, lo que es coherente con la mayor intensidad de la niebla sobre este último aeropuerto.

Para el caso del aeropuerto de Lima-Callao, figura 3b, indicaba que a 850 hPa la advección fría era importante, lo

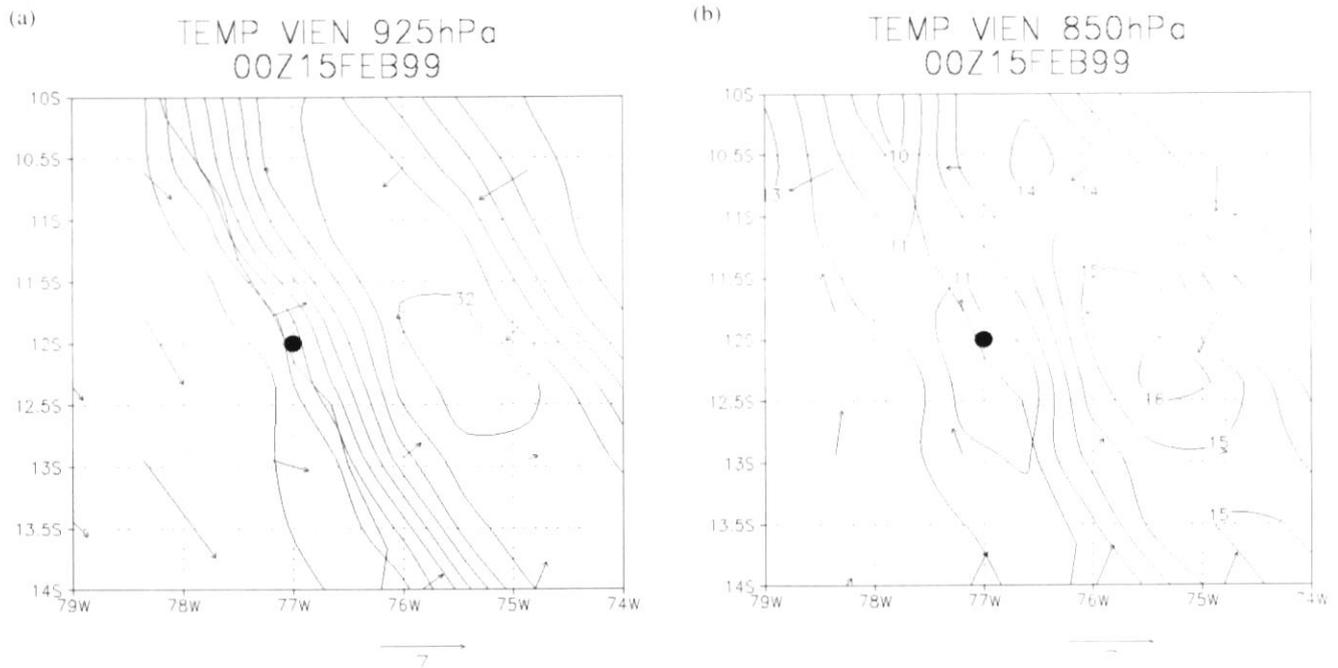


Figura 4. Mapas de Vientos y Temperaturas 15 de febrero de 1999 00Z cerca del aeropuerto de Lima-Callao. Punto negro indica ubicación del aeropuerto. (a) 925hPa. (b) 850hPa.

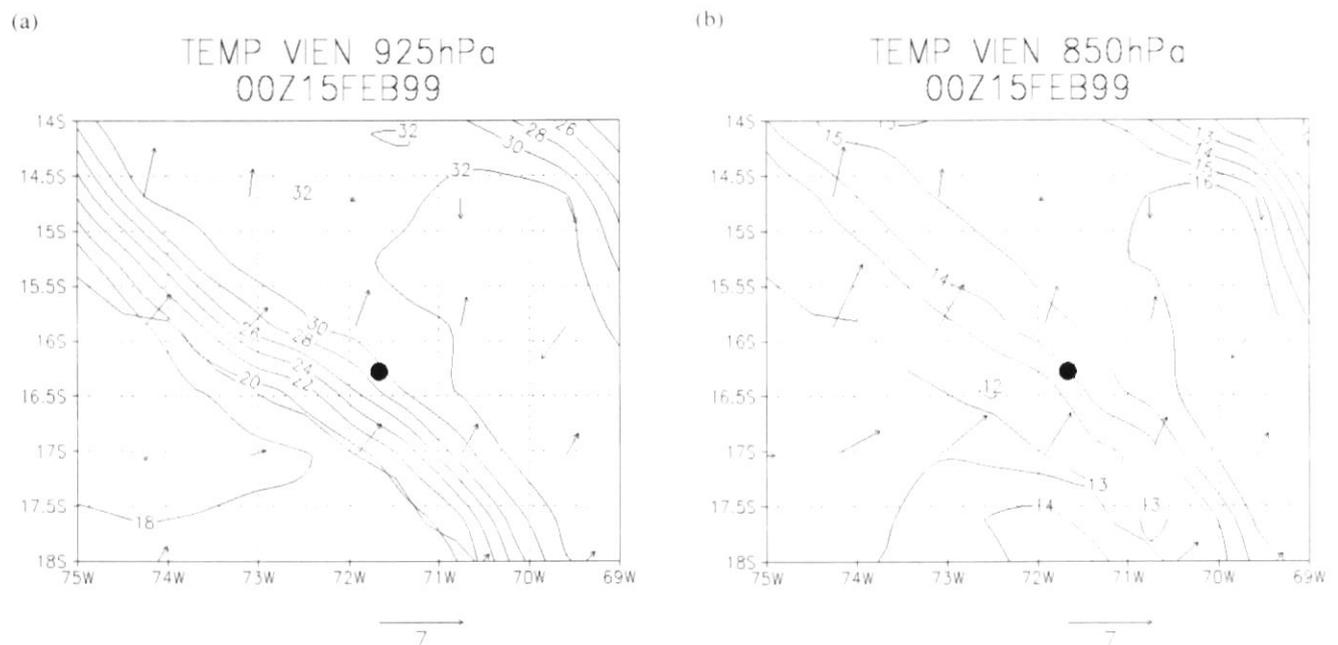


Figura 5. Mapas de Vientos y Temperaturas 15 de febrero de 1999 00Z cerca del aeropuerto de Arequipa. Punto negro indica ubicación del aeropuerto. (a) 925hPa. (b) 850hPa.

cual es corregido por el modelo RAMS (figura 4b). En resumen, según RAMS, sólo en el nivel de 925 hPa se nota significativa advección fría producida por relativamente intensos vientos del Oeste en interacción con un intenso gradiente de temperatura.

Sin embargo, en el nivel de 850 hPa, los vientos no son favorables para producir una significativa advección fría,

indicando que sólo una pequeña capa atmosférica pudo haber tenido las condiciones adecuadas para una acentuada subsidencia, en comparación con lo mostrado en la figura 5, en la que se presentan las condiciones correspondientes a Arequipa, en que una capa de mayor extensión que incluía 925 y 850 hPa se caracterizó por significativa advección fría en la zona.

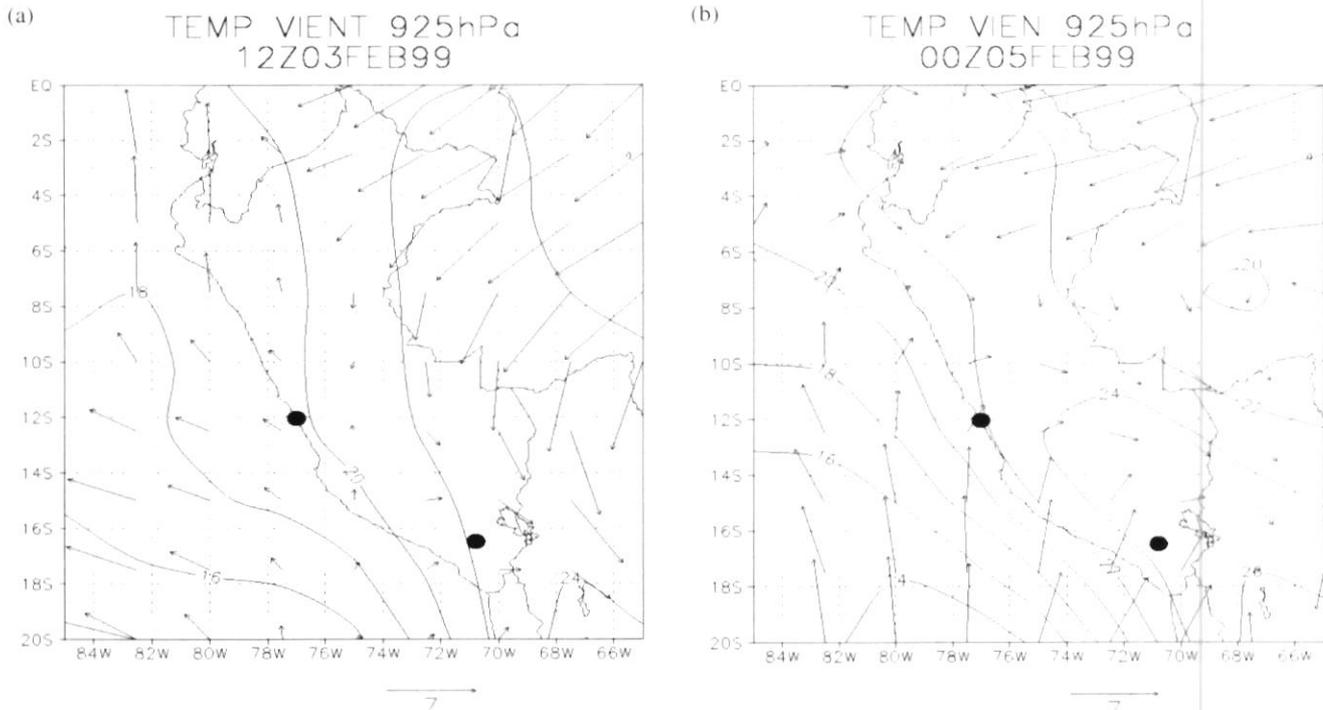


Figura 6. Mapas de Vientos y Temperaturas a 925hPa (a) 12Z 03 de ferero de 1999 (b) 00Z 05 de febrero de 1999 producidas por Reanálisis (Macro escala). Puntos negros indican ubicación de aeropuertos de Lima-Callao y Arequipa

4. DISCUSION

Respecto a la factibilidad de la predicción de nieblas, un pronosticador debería estar atento a los análisis meteorológicos de macro escala (NCEP).

Por ejemplo, puede apreciarse en la figura 6 que el gradiente de temperatura a nivel de 925 hPa se intensificó substancialmente a partir del 05 de febrero asociado con un incremento en la intensidad de los vientos alisios. Adicionalmente con vientos cruzando las isotermas tanto en la región de Lima-Callao como en Arequipa, se dan las condiciones potenciales para la presencia de nieblas o neblinas.

En los días siguientes se intensifican los vientos provenientes del sur y correspondientemente aumenta el gradiente térmico cerca de la costa tal como puede apreciarse en la figura 6b durante el 05 de febrero. A partir de ese día con presencia de vientos provenientes del mar transportando aire húmedo hacia la costa y con una inversión térmica intensa, se dan las condiciones para la presencia de nieblas, tal como los datos de la tabla 1 así lo verifican.

El diagnóstico realizado permite identificar los mecanismos físicos responsables de la presencia de nieblas en la costa de Perú. Ellos son los vientos y temperaturas que en niveles cercanos a 1 500 msnm configuran un patrón de advección fría del mar hacia continente. Se plantea la hipótesis que dicha advección podría producir subsidencia o movimientos descendentes que intensificarían la inversión térmica de la zona.

El efecto de la intensa inversión es la de producir una lid u obstáculo que evita el flujo de aire tanto hacia arriba o abajo.

Por debajo de ese nivel predominan vientos del oeste transportando humedad desde el mar hacia continente. Dicha humedad queda atrapada por debajo de la inversión ya que tampoco podría desplazarse hacia el Este impedido por la Cordillera de los Andes. El resultado final es la disminución de la visibilidad en la zona.

En un análisis más detallado se están estudiando las condiciones meteorológicas responsables de la presencia de la circulación ciclónica en la costa de Perú, que a partir del 05 de febrero se estableció casi permanentemente en la zona (Figuras 3 y 6b) y que fue responsable del transporte de humedad del mar hacia continente.

En un servicio de pronóstico operativo, si se aprecian condiciones apropiadas para la presencia de nieblas en el análisis de macro escala, se procedería a procesar el modelo RAMS para un mayor detalle de las condiciones atmosféricas en las regiones de interés.

5. CONCLUSIONES

Como resultado del presente estudio se sugieren las siguientes conclusiones:

- Se ha logrado identificar que advección fría entre 1 000 y 1 500 msnm como un factor importante para la producción de severas nieblas sobre los aeropuertos de Lima-Callao y Arequipa.
- Para verificar que dicho parámetro es importante, es necesario establecer su participación dentro de los mecanis-

mos responsables de la presencia de nieblas. Es así que se plantea la hipótesis de que la advección fría a los niveles mencionados sería capaz de producir substanciales incrementos de movimientos subsidentes que intensificarían la inversión térmica, lo cual obligaría a que la humedad atmosférica quedara atrapada por debajo de ella en niveles cercanos a la superficie terrestre.

- Dicha humedad es continuamente incrementada por la presencia de vientos provenientes del Oeste que transportan aire húmedo del mar hacia continente. El resultado final es la disminución substancial de la visibilidad.
- Respecto a la factibilidad de predicción de nieblas se su-

giere que ello es posible al analizar atentamente los mapas de macro escala producidos por NCEP. Cuando se aprecie substancial aumento de advección fría a niveles de 925 y/o 850 hPa se sugiere procesar el modelo RAMS para verificar la posibilidad.

BIBLIOGRAFIA

- Lee, T. J. Turk; Richardson, K. 1997. Stratus and fog products using GOES 8-9 3.9 um data. *Weather and Forecasting*, 12: 664-677
- Wylie, D. B. Hinton; Kloesel, K. 1989. The relationship of marine stratus clouds to wind and temperature advection. *Monthly Weather Review*, 117: 2620-2625.

DISEÑO Y CALIBRACION DE UN MODELO DE PRONOSTICO DE COSECHA EN EL MAIZ

Carlos Bustíos Dávila*

Dirección General de Agrometeorología, SENAMHI, Jesús María, Lima

RESUMEN

En el marco del manejo del clima y de la seguridad alimentaria con tecnología limpia para nueva estructura, sistemas funcionales y rendimientos, en variedades e híbridos de cultivos que se vienen comercialmente introduciendo en el país, se ha calibrado y validado un biomodelo de pronóstico de cosecha para el cultivo de Maíz Amarillo Duro (MAD) industrial Cargill 701 en condiciones de la costa central del Perú en las coordenadas geográficas longitud W 77° 14', latitud S 11° 8' y a una altura de 470 msnm, cuenca del río Huaura.

Según los indicadores de biomasa, luego del rastreo, identificación en campo se determinó el incremento de biomasa por unidad de superficie. Luego de la triangulación de la altura h = altura, \emptyset = diámetro de tallo, n/h = número de hojas en su relación porcentual con el desplazamiento de su eje embrional; al maíz híbrido Cargill 701, recientemente introducido en el Perú, le corresponde un peso liviano entre 100 - 200 gramos menores que las variedades graneras comerciales. La temperatura biológica (suma de temperaturas activas de 3 000°C) indica que el MAD Cargill 701 pertenece al tercer grupo de periodo vegetativo tardío de la FAO y finalmente los rendimientos estimados en promedio fueron próximos a sus valores reales con una diferencia de 196,4 kg.

1. INTRODUCCION

La Agrometeorología es una disciplina científica que está relacionada con los graves problemas que afronta la humanidad, expresada en la existencia de más de 800 millones de personas subalimentadas en los países en desarrollo, siendo nuestro país parte de esa problemática; de allí la importancia de abordar el déficit alimentario a través de propuestas viables que puedan contribuir con el llamado de la FAO, satisfaciendo las necesidades básicas de millones de peruanos que sufren hambre y desnutrición.

Afortunadamente en el Perú ya se están dando los primeros pasos para que las instituciones especializadas de los sectores público y privado se esfuercen en desarrollar un diseño estandarizado de información sobre las condiciones de la producción, mercadeo, almacenamiento y disponibilidad de los cultivos, mediante un sistema integrado como la constitución de un comité nacional de seguridad alimentaria, el cual estaría sustentado con la puesta en marcha de un *modelo de pronóstico de cosecha*.

Es ya conocido que la crisis de la agricultura peruana se debe, entre otros, a la baja producción y rendimiento de los cultivos, particularmente del maíz industrial que tiene el más bajo rendimiento en Sudamérica: 2 a 6 t/ha.

La demanda nacional se incrementa cada día por la alta tasa demográfica, los cambios de hábitos en la alimentación, nuevos mercados que inciden en la importación masiva del maíz, manifestada el año 1999 cuando se importó 1 034 000 toneladas de MAD.

En el marco de esta realidad es que se han seleccionado los lugares más representativos de los valles maiceros del Perú para las condiciones de la costa central, localizadas en las coordenadas geográficas: longitud W 77° 14', latitud S 11° 8' y a una altura de 470 msnm (cuenca media del río Huaura, Lima).

Objetivos

- Aplicar nuevos sistemas de pronósticos basados en la relación clima - suelo - planta.
- Diseñar y calibrar biomodelos de pronósticos de cosecha con tecnología limpia para las condiciones de la costa central.
- Elevar los rendimientos en calidad, productividad y rentabilidad del maíz, con cosechas en fechas óptimas como es el caso del llamado punto "ch" (chala cocleada de un alto valor energético) y del maíz, grano en condiciones de óptima humedad, cantidad y calidad del grano.

2. METODOLOGIA

- Formulación del modelo bioclimático de geometría variable en base a la revisión bibliográfica, adecuación de técnicas de muestreo y pronóstico de rendimiento del maíz forrajero y el MAD.

* Dr. en Meteorología, Dirección General de Agrometeorología, SENAMHI.
e-mail: dga@senamhi.gob.pe, wyzarra@senamhi.gob.pe



Figura 1. Calibración del diámetro (ϕ) del tallo del maíz Cargill Híbrido 701, con 0,1 cm de precisión. Laboratorio de la DGA - SENAMHI



Figura 2. Indicadores de desarrollo sustentable (IPCC). Mediciones de biomasa improductiva, para cálculo de residuos orgánicos - quema de cosecha, que generan emisiones de gases de efecto invernadero.

- Se **inició** un programa de observaciones en el campo para determinar el índice foliar FAO, la identificación y clasificación de las variedades e híbridos comerciales de maíz, según su periodo vegetativo, que se cultivan en la costa central.
- Se procedió al monitoreo interno sobre el Desplazamiento de la Espiga Embrional - DEE (etapa experimental) y al monitoreo externo en torno a la fenología.

3. PROCEDIMIENTO

Se realizó el análisis comparativo y diferencial de altura, diámetro y número de hojas, la calibración del peso de la planta, evaluación de los elementos de productividad y la clasificación varietal del MAD (ver figuras 1 y 2).

Para calcular la capacidad de respuesta, niveles de sensibilidad, presión y funcionalidad del modelo, se determinaron bioindicadores simples y de desarrollo sustentable, con mediciones diferenciadas de biomasa productiva e improductiva, para los cálculos del "precio sombra", por quema de residuos orgánicos de las cosechas que causan la emisión de gases de efecto invernadero, seguimos las normas de manejo metodológico para inventarios agrícolas sobre los cambios climáticos del Panel Intergubernamental - IPCC.

4. RESULTADOS

a. Parámetros predictores de cosecha maíz grano

Para la siembra y cosecha de maíz comercial híbrido Cargill 701 y Star, los resultados fueron los siguientes:

| | |
|----------------------------|--------------------|
| Altura promedio planta (h) | 173 cm |
| Diámetro del tallo | 5 cm |
| Superficie foliar (SF) | 48 cm ² |

| | |
|-------------------------|--------------|
| Índice foliar | 4,84 |
| Potencial fotosintético | 242 g/planta |

b. Índice de panojamiento

| Número de hojas | % |
|-----------------|-----|
| Más de 18 | 0,5 |
| 18 | 2,5 |
| 17 | 30 |
| 16 | 45 |
| 15 | 22 |

c. Parámetros predictores del punto "ch"

| Parámetro | Índice |
|----------------------------|--------------|
| Siembra - salida de panoja | 94 días |
| Diámetro del tallo | 2,2 cm |
| Altura de la planta | 1,65 cm |
| Potencial fotosintético | 261 g/planta |

d. Índices bioclimáticos - Fase fenológica (estratégica)

| | | | |
|-----------------------------|---|------|----|
| Siembra - salida del panoja | : | 17,3 | °C |
| Suma de t. Activos | : | 1623 | °C |
| Suma de t. Efectivas | : | 638 | °C |

e. Índices bioclimáticos - Periodo vegetativo

| | | | |
|-------------------------|---|------|----|
| Siembra - cosecha grano | : | 17,6 | °C |
| Suma de t. Activas | : | 3000 | °C |
| Suma de t. Efectivas | : | 1294 | °C |

f. *Clasificación bioclimática FAO*

| Grupo | Suma t. Activa > 10°C | Clasificador |
|-------|-----------------------|--------------|
| 1 | 1 500 – 2 000 | Precoz |
| 2 | 2 100 – 2 500 | Semiprecoz |
| 3 | 2 600 – 3 000 | Tardío |
| 4 | 3 100 – 3 200 | Muy tardío |

g. *Rendimiento del maíz grano*

Rendimiento potencial (RP)

Mazorca > 10 cm largo : 12 647 kg/ha
 Mazorca > 15 cm largo : 10 309 kg/ha

h. *Rendimiento virtual para tres categorías*

3ra categoría < 20 cm 9119,4 kg/ha
 2da categoría > 20 y < 30 cm 8224,6 kg/ha
 1ra categoría > 30 cm 7929,9 kg/ha
 promedio 8424,6 kg/ha
 rendimiento en campo 8621 kg/ha
 diferencia 196 kg/ha

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Según los indicadores de biomasa, el maíz Cargill 701 tiene un peso liviano, entre 100 y 200 g menor que las varie-

dades graneras.

- La suma de temperaturas activas de 3 000 °C indican que el MAD Cargill 701 pertenece al tercer grupo de plantas tardías de la clasificación FAO.
- Los rendimientos estimados promedio fueron próximos a sus valores reales con una diferencia de 196,4 kg.
- El secado de grano debe estar sujeto al control de calidad de la humedad - estándar (14,5 %), de acuerdo con las normas de comercialización de grano - INDECOPI.
- Se continúa con las observaciones biométricas realizando los ajustes y la validación del modelo de pronóstico de cosecha.

BIBLIOGRAFIA

Manual del agrónomo. 1972. Editorial Kolas. Moscú, 154-168.
 García Villanueva, J. 1992. Agrometeorología. UNALM. Lima, Perú.
 Tsuji Górdon Y.; Uehara Goro; Balas Sharon. 1994. DSSAT, version 3. Volumen 3. International Berchmark, sites Network for Agrotechnology Transfer. University of Hawai, Honolulu, Hawai.
 Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático. 1992. Evaluación de impactos OMM - PNUMA. Madrid, España.
 La Hun. 1988. IBSNAT Genetic coefficients coping with germoplasm diversity agrotechnology transfer. N° 7, pag. 1-5.
 Kulikov, O. J. 1985. Agrometeorología tropical. Editorial Científico Térmica. La Habana, Cuba.
 Ministerio de Agricultura. Oficina de Información Agraria. 2000. Maíz amiláceo en cifras. 1(1). Lima, Perú.

AUTOMATIZACION DEL MAPA DE CLASIFICACION CLIMATICA DEL PERU

Luis Enrique Altamirano Picón*, Ever Enrique Castillo Osorio, Erika Colquehuanca Achulli,
Arturo Mundo Chumbes y Ada Vanessa Vásquez Solís
*Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica, Oficina General de Estadística e Informática,
SENAMHI, Jesús María, Lima.*

RESUMEN

Esta investigación se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica del SENAMHI a fines del año 2000, ante la necesidad de contar con un sistema de información automatizado que analice y consulte, sobre mapas digitales, las características climatológicas del territorio peruano. La técnica utilizada fue la de automatización cartográfica vectorial y el modelo relacional de base de datos, que tuvo como resultado principal el sistema de información espacial de consulta climatológica y como resultado secundario mapas climáticos a escala. Con este trabajo se logró probar la gran utilidad de los sistemas de información geográfica en la generación de cartografía automatizada y desarrollo de sistemas de información geoespacial, ya que proporcionan las herramientas más potentes y versátiles para obtener resultados que antes parecían inalcanzables para las ciencias del espacio.

1. INTRODUCCIÓN

Contar con un sistema de información climatológica que responda a las consultas de los usuarios y garantice un análisis climatológico correcto del mismo es la principal justificación que generó la idea de realizar el presente trabajo. Para cubrir esta necesidad se plantea como objetivo general automatizar el mapa climático del Perú elaborado por el SENAMHI, y como objetivos específicos generar un sistema de información de consulta y análisis espacial climatológica y mapas climáticos del Perú a escala.

El clima, como hecho geográfico importante en el desenvolvimiento social y económico, es fundamental, así como el describirlo y localizarlo en el espacio para dar soporte a las tomas de decisiones; por ello la necesidad de contar con todo un especializado sistema automatizado que permita resolver dichas inquietudes.

Hablar hoy en día de los Sistemas de Información Geográfica como herramienta para la solución de diversos problemas espaciales, incluyendo el clima, es hablar de todo un campo interdisciplinario que ofrece un sinnúmero de soluciones que se adecúan a las necesidades institucionales y sobre todo a los fenómenos y/u objetos espaciales por analizar y consultar. Es así que el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica, en concordancia con sus funciones, utiliza dicha metodología para cumplir con sus metas.

2. METODOLOGÍA

Para la automatización del mapa climático del Perú se utilizó la técnica de "conversión de datos analógicos en vectoriales", para la cual se empleó el software ArcView GIS 3.1 y el uso de periféricos de entrada y salida de datos (tabletes digitalizadores, escáner y plotter), que comprende los siguientes procedimientos: Digitalización, que consiste en rastrear mediante un cursor óptico el mapa climático del Perú para capturar la posición geográfica en coordenadas de las diferentes unidades climáticas, almacenadas por un software especializado en el computador. Después sigue el procedimiento de Edición en donde se verifica y corrige los posibles errores del procedimiento anterior; aquí se obtiene el mapa base. El procedimiento siguiente es paralelo a los anteriores y es de Modelamiento de la Base de Datos conteniendo los atributos climatológicos. Posteriormente, se interrelacionan el mapa base con las tablas de atributos climatológicos mediante comandos especiales, generando así el sistema de información espacial climatológico.

3. RESULTADOS

El sistema de información climatológica mostrará en un tiempo rápido y desplegado en mapas a escala o en pantalla cualquier consulta climática que se realice al respecto; en la Figura 1 se muestra el despliegue en pantalla de la interfase del sistema. Las principales consultas que el sistema estará en la capacidad de absolver son: identificación de promedios de diferentes parámetros meteorológicos, zonificación climática a nivel de división política y de cuenca (departamentos, provincias, distritos, cuenca, subcuenca, etc.), zonas de influencia climática, posibles zonas de alteraciones climáticas ya que

* Ing. Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica, Oficina General de Estadística e Informática, SENAMHI.
e-mail: ogei@senamhi.gob.pe

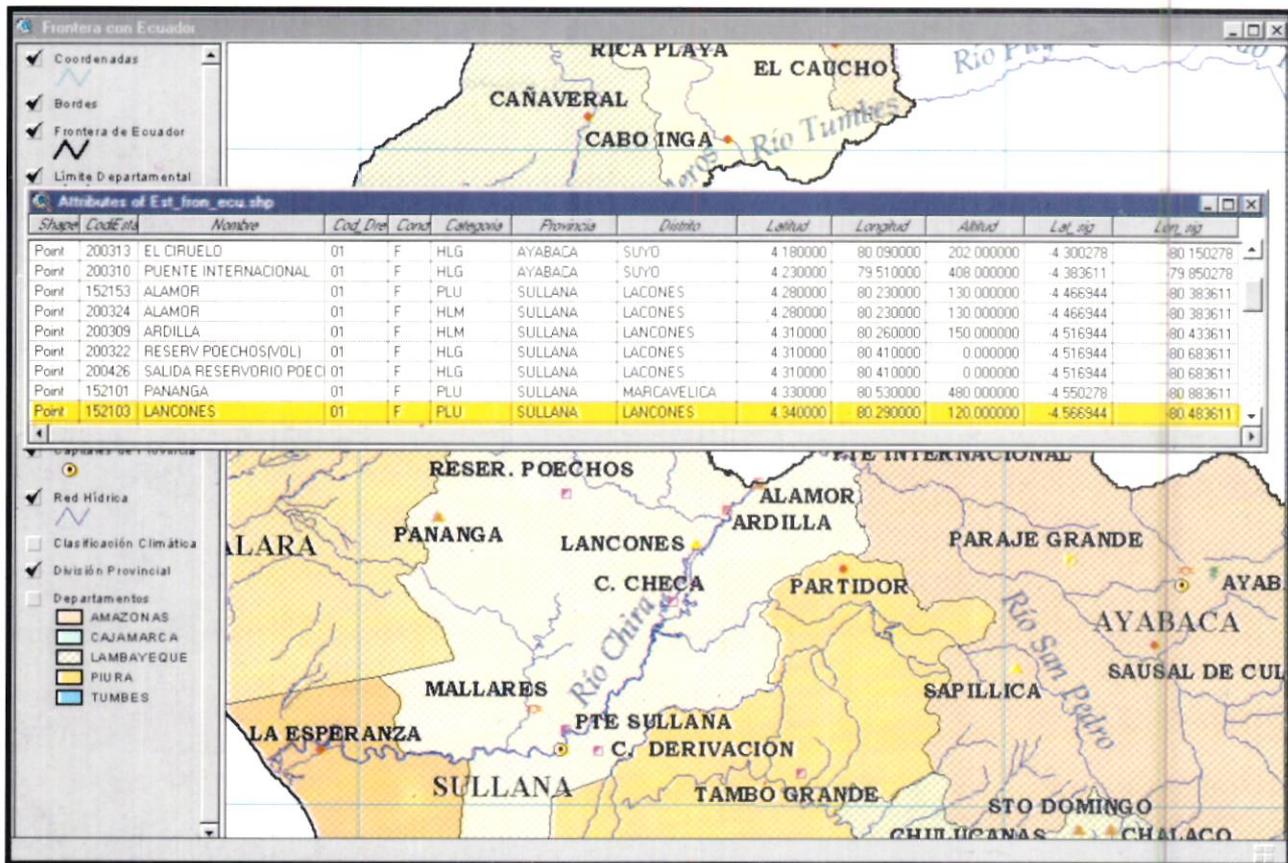


Figura 1. Ventana principal del Sistema de Información Espacial Climatológico

el sistema podrá ser actualizado constantemente (cambio climático), entre otras. En la Figura 2 se presenta un mapa climático correspondiente a todo el territorio peruano, el cual es un producto automatizado del sistema de información espacial climatológico.

4. CONCLUSIONES

El sistema de información geográfica (SIG) es una herramienta tecnológica que tiene la capacidad de manipular, analizar, modelar y desplegar cualquier tipo de información localizable en el espacio. Así se puso de manifiesto al ser capaz de automatizar cartográfica y analíticamente (base de datos) diferentes hechos geográficos tales como la localización

y clasificación climática.

El sistema de información espacial climatológico generado a través del SIG, permite realizar cualquier tipo de consulta geográfica relacionada a la clasificación climática del Perú y tiene la capacidad de representar en mapas a escala dichas consultas, que facilitan la toma de decisiones.

BIBLIOGRAFÍA

Mitchell, Andy. 1999. GIS analysis. Volume 1. Environmental Systems Research Institute, Inc. Redlands-CA, USA. 9-16 p.
 Zeiler, Michael. 1999. Modeling our world. Guide to geodatabase design. Environmental Systems Research Institute, Inc. Redlands-CA, USA. 1-58 p.

MODELO HIDROLOGICO PARA PRONOSTICO EN EL RIO RIMAC

Gonzalo Fano Miranda*

Centro de Predicción Numérica, Dirección General de Meteorología, SENAMHI, Jesús María, Lima.

RESUMEN

En la planificación y operación de los recursos hidráulicos es de vital importancia conocer las disponibilidades del recurso agua y su distribución a través del tiempo. En la gestión de una cuenca interesa conocer los volúmenes de agua con que se dispone para satisfacer las necesidades de agua actuales y futuras de las diferentes demandas de una cuenca, asimismo se requiere prevenir las inundaciones en las épocas de avenida.

En el presente trabajo de investigación se ha probado una metodología que nos permite pronosticar las escorrentías de una cuenca para períodos cortos y largos de tiempo; utilizando el modelo Sacramento - HFS se puede realizar pronósticos hasta para tres días utilizando como input las precipitaciones pronosticadas por el modelo ETA, y utilizando el modelo EHF podemos realizar pronósticos a largo plazo hasta 120 días, lo cual nos posibilitaría realizar una planificación.

El proceso de la investigación tiene una fase de calibración mediante el modelo SAC y luego con el HFS en base a los parámetros obtenidos inicialmente, luego sigue la fase de validación y por último la fase de pronóstico en corto y largo plazo.

1. INTRODUCCION

El SENAMHI, como parte del Proyecto "Mejoramiento de la Capacidad de Pronóstico y Evaluación del Fenómeno El Niño, para la Prevención y Mitigación de Desastres en el Perú", ha creado el Centro de Predicción Numérica equipándolo con hardware de primer nivel, así como de software para la modelación numérica en tres grandes áreas: tiempo, clima e hidrología - hidráulica.

En el caso específico de hidrología, se ha dotado de modelos hidrológicos como son el Sacramento, Hydrologic Forecast System (HFS), Ensamble Hydrologic Forecast (EHF), Hydrologic Modelling System (HMS) y River Analysis System (RAS).

En una primera etapa se ha venido trabajando con los modelos Sacramento, HFS y EHF aplicados en la cuenca del río Rímac, bajo una escala de tiempo diaria. Estos modelos utilizados se clasifican dentro de los llamados conceptuales, que relacionan la precipitación y la escorrentía que se producen en una cuenca.

Este estudio ha consistido en realizar todos los procesos que se deben seguir en una modelación, partiendo de la estandarización de la información disponible, tanto de las variables precipitación, caudales y evapotranspiración, como de los diversos parámetros de la cuenca y pasando por la calibración entre los caudales observados y los pronosticados por el modelo; la validación y el pronóstico de esta última etapa se

viene trabajando diariamente con el acoplamiento de los resultados de precipitación producidos por el modelo ETA, que es uno de los modelos numéricos del tiempo que el Centro de Predicción Numérica viene desarrollando también.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

Los modelos de simulación hidrológica

El procedimiento que más promete en la aplicación de la computación e informática a la cuenca hidrológica, es el de simulación, o sea, la representación de un sistema hidrológico por un modelo matemático que pueda reproducir el comportamiento del sistema natural (Linsley, 1977). En aplicaciones concretas a la hidrología, los modelos de simulación se pueden clasificar en tres tipos: de simulación estocástica, de simulación numérica y de simulación paramétrica.

Los modelos de simulación paramétrica, son modelos donde el sistema hidrológico está representado por una serie de formulaciones matemáticas que describen la respuesta del sistema, o de una parte de él, a los datos de entrada. Los procesos físicos tales como infiltración, evapotranspiración, escurrimiento, flujo subterráneo y escorrentía están expresados como una relación funcional que responde a ciertos datos de entrada como la precipitación y la evapotranspiración (Duque).

García, M. (1976) menciona algunos modelos de simulación a escala mensual: (1) el de Riley et al. para la cuenca del río Circle Valley, U.S.A., para ser procesado por computadora analógica; (2) el de Riel et al. desarrollado para estimar la escorrentía mensual de la región Paez Pedraza en Venezuela;

* Msc. Ingeniería de Recursos Hídricos, Dr. Ingeniería de Sistemas, Centro de Predicción Numérica, SENAMHI.
e-mail: gfano@senamhi.gob.pe

(3) el Modelo de Amisial y Uzcátegui para el sistema hidrológico del Alto Apure, Venezuela, para ser procesado por computadora híbrida.

En 1972, Haan, C. reporta la construcción de un modelo, cuyo desarrollo formó parte del Proyecto de Investigación Regional del sur de los Estados Unidos de América.

El objetivo específico de esta parte del proyecto regional, fue desarrollar un modelo hidrológico capaz de simular las escorrentías mensuales de una cuenca. Este modelo considera a la escorrentía total compuesta por la escorrentía directa o superficial y la escorrentía subsuperficial. Algunas condiciones del modelo fueron que debería ser de fácil aplicación, relativamente simple en concepto y que requiriera un mínimo de datos de entrada.

Crawford y Linsley (1966), reportan el desarrollo de un modelo hidrológico de simulación en la cuenca hidrográfica de Stanford, U.S.A., cuyos datos principales fueron precipitación horaria, evapotranspiración diaria, temperatura, etc. El modelo se denominó "Stanford Watershed Model IV". Los cálculos de escorrentía se efectúan separadamente para cada segmento de la cuenca, siendo necesario la estimación de 15 parámetros que considera el modelo.

3. MATERIALES Y METODOS

Con el modelo hidrológico Sacramento se pretende pronosticar escorrentías promedio diarias.

La información que se dispone es la siguiente:

- Carta Nacional 1/100 000.
- Precipitaciones totales diarias de las estaciones de Casapalca, Río Blanco, Milloc, San José de Parac, Sheque, Matucana, Carampoma, Autisha y Santa Eulalia.
- Caudales medios diarios del río Rímac en la estación de Chosica.
- Parámetros iniciales de la cuenca.

Características de la cuenca

La cuenca del río Rímac, con un área de 2 386 km², se localiza en la costa central del Perú entre las latitudes de 11° 25' a 12° 15' S y longitudes de 76° 05' a 77° 10' W; las altitudes de la cuenca varían entre los 900 msnm. a 4 200 msnm. La cuenca se muestra en la figura 1.

Por su considerable diferencia de alturas entre la cordillera y la zona baja, se encuentran los más diversos climas, desde los muy fríos hasta los más calientes del propio valle.

Teoría del modelo hidrológico

El modelo hidrológico utilizado en esta investigación es el Sacramento, que permite predecir las escorrentías diarias de una cuenca. El modelo tiene como criterio básico ser un modelo matemático capaz de simular las escorrentías diarias.

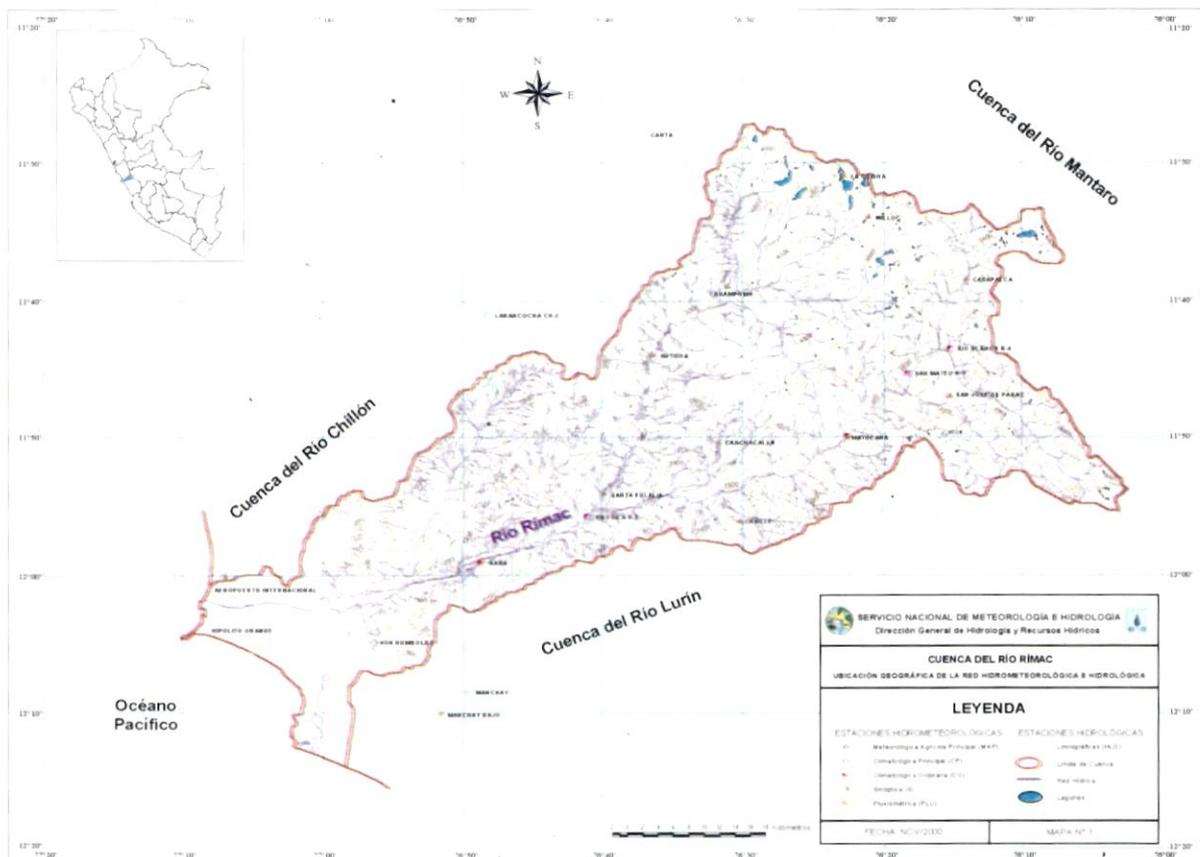


Figura 1. Cuenca del río Rímac

El principio de funcionamiento del modelo es un balance de humedad de las capas inferiores del suelo de la cuenca. El agua precipitada es utilizada en los procesos de almacenamiento de humedad en el suelo, percolación profunda, evapotranspiración, escorrentía superficial y escorrentía subsuperficial.

Procesos que considera el modelo hidrológico

a. La precipitación

Se considera universalmente que la precipitación es el factor primordial que determina la escorrentía. La distribución de la precipitación, tanto en el espacio como en el tiempo, se hace necesaria para lograr una determinada respuesta de la cuenca con bastante aproximación.

La variable precipitación, hace necesaria su estimación promedio en el área bajo estudio, partiendo de los registros de estaciones pluviométricas; existen diversos métodos para determinar la precipitación media areal como el promedio aritmético, los polígonos de Thiessen, las isoyetas y las distancias inversas combinadas con gradientes de altura – precipitación.

b. La precipitación media areal (MAP)

En la investigación desarrollada se ha utilizado el método de las distancias inversas entre las grillas y las estaciones de medición en la cuenca combinadas con el gradiente altura – precipitación, método que viene a ser una medida ponderada; en principio, se calcularon las ecuaciones de gradiente de alturas – precipitación para cada mes a partir de los datos de las estaciones definidas en la investigación.

Luego, en base a estas ecuaciones se procedió a definir el engrillado de la cuenca en número de 11, estimándose la cota del centroide de cada grilla considerada.

Posteriormente, se determinaron las precipitaciones para cada grilla utilizando las ecuaciones de gradiente obtenidas para cada mes, asimismo se calcularon las distancias inversas entre cada una de las estaciones de precipitación consideradas y las 11 grillas de la cuenca.

- El cálculo de la precipitación media mensual para cada grilla Pg_j se realiza utilizando la ecuación siguiente:

$$Pg_j = \alpha + \beta * ELg_j$$

Donde: ELg_j es la elevación de la j^{th} grilla, α y β son los coeficientes derivados de los ajustes de las ecuaciones con las estaciones de la investigación.

- El cálculo de la componente de corrección por gradiente δ_i , se calcula con la siguiente ecuación:

$$\delta_i = P_i - (\alpha + \beta * ELg_j)$$

Donde: P_i y EL_i son las precipitaciones y elevaciones ob-

servadas respectivamente de la estación i^{th} , α y β son los coeficientes derivados de los ajustes de las ecuaciones con las estaciones de la investigación.

Para calcular el promedio ponderado de los residuales de cada grilla utilizamos lo siguiente:

$$Rg_i = \sum w_j \delta_j \text{ para } i=1 \text{ a } \# \text{ estaciones}$$

$$w_j = 1/d_{ij}^2 / \sum (1/d_{ij}^2) \text{ para } j = 1 \text{ a } \# \text{ de grillas}$$

Donde el peso es calculado usando la distancia inversa al cuadrado d_{ij}

- La precipitación calculada para cada grilla como suma de las dos componentes es obtenida con la siguiente ecuación:

$$Pg_j = Pg_i + Rg_j$$

Finalmente el cálculo del MAP para la cuenca es igual a la sumatoria de las precipitaciones en las grillas tal como se muestra en la ecuación siguiente:

$$MAP = \sum Pg_j$$

Cálculo de parámetros del modelo Sacramento

- LZPK. Es obtenido planteando en escala semilogarítmica una porción de la recesión de un hidrograma, tomando Q_1 y Q_2 , separados por un Δt obteniéndose:

$$LZPK = 1 - (Q_2/Q_1)^{1/\Delta t}$$

- LZSK. Plotear el flujo base observado en escala semilogarítmica tomando Q_3 y Q_4 separados por un Δt obteniéndose:

$$LZSK = 1 - (Q_4/Q_3)^{1/\Delta t}$$

Nota: LZSK siempre mayor que LZPK

- PCTIM. Cálculo en base a la relación de un volumen de escorrentía V_{ro} y el volumen precipitado V_{pc} tomado de una pequeña parte ascendente de un hidrograma en la estación de verano.

$$PCTIM = V_{ro} / V_{pc}$$

- UZTWM. Para la estimación de este parámetro utilizar eventos con pequeña o moderada elevación de un hidrograma de verano luego de un período seco, y sólo con una pequeña cantidad de recarga ocurrida.

- LZFPM. Usando un ploteo semilogarítmico de la recesión, extienda el flujo base aproximadamente a un nivel más alto del flujo base primario; llamar a este flujo Q_x

$$LZFPM = Q_x / LZPK$$

- LZFSM. Se estima similarmente a LZFPM; replotea el flujo base observado en escala semilogarítmica y extender el flujo a un nivel alto de un suplemento de flujo base Q_x .
- UZK. Inicialmente utilizar un valor nominal de $UZK=0.3$
- PFREE. Observar recargas de flujo base cuando los periodos $UZTWC = UZTWM$ pero cuando $LZTWC < LZTWM$
- UZFWM. Estima el valor inicial basado en la frecuencia de la escorrentía superficial (tabla 1).
- ZPERC & REXP. Las estimaciones iniciales se realizan por tipos de suelo (tabla 2).

Tabla 1.

| Frecuencia de Escorrentia | UZFWM Inicial |
|----------------------------------|---------------|
| Casi cada evento | 10 – 15mm |
| En eventos pesados | 15 – 25mm |
| Solamente durante eventos largos | 25 – 40mm |
| Nunca | > 40mm |

Para pequeña a ninguna recarga PFREE = 0.0 – 0.1
 Con recarga notable PFREE = 0.2 – 0.3
 Recarga significativa PFREE = 0.4 – 0.5

Tabla 2.

| Tipo de Suelo | Hidrograma característico | Valor inicial |
|---------------|---|--------------------------------------|
| Arcilla | Mucha escorrentía y pequeño flujo base | ZPERC = 75 – 200 REXP = 2.5 – 3.5 |
| Cieno | En algunas escorrentías flujo base moderado | ZPERC = 20 - 75 REXP = 1.8 – 2.0 |
| Arena | Pequeña escorrentía y solamente en eventos largos | ZPERC = 5 – 20 REXP = 1.4 – 1.8 |

4. RESULTADOS Y DISCUSION

Gradientes de altura – precipitación

Relacionando las cotas de cada una de las estaciones de precipitación consideradas, para cada mes se logró obtener las ecuaciones que nos muestran el comportamiento lineal con un alto coeficiente de correlación. Una muestra de estos resultados se da en la figura 2.

Precipitación media areal de la cuenca

Considerando las 10 estaciones pluviométricas para el período de 1988 al 2000, se han calculado las precipitaciones medias areales para cada día, para lo cual se ha utilizado el programa map.f elaborado en lenguaje fortran F90, obteniéndose el archivo map_rimac.dat cuyos resultados son mostrados en la figura 3.

Calibración gráfica de los parámetros

La calibración de los parámetros se fue realizando en base a simulaciones de las escorrentías esperadas y comparándolas en forma gráfica con las escorrentías observadas. En la figura 4 se muestra este proceso.

Pronóstico a corto plazo con el HFS

Luego de calibrado el modelo SAC se procedió a la utilización del modelo HFS para inicialmente hacer un afinamiento estadístico en la calibración y luego, en base a los pronósticos de precipitación a través del modelo ETA, se pronostica los caudales hasta para cinco días de anticipación; estos resultados son mostrados en la figura 5.

Pronóstico a largo plazo con el EHF

Para el caso del pronóstico a largo plazo se utilizó el modelo EHF que nos permite realizar los pronósticos hasta 120 días para diferentes niveles de probabilidad de no excedencia; estos resultados son mostrados en la figura 6.

Pronóstico de caudales máximos diarios

Apoyados en el modelo HFS para pronósticos a corto plazo, y estos resultados relacionados estadísticamente con los caudales máximos diarios observados, nos han permitido obtener pronósticos de fajas de confianza de caudales máximos, cuyos resultados son mostrados en la figura 7.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- La calibración obtenida del modelo a la cuenca del río Rímac es bastante satisfactoria, pero podría mejorarse si se realizara un trabajo de campo adicional.
- Los resultados obtenidos en el ajuste del modelo indican que con la metodología desarrollada en la presente investigación, se pueden simular con buen grado de confianza los caudales diarios en la cuenca del río Rímac.
- En base a los caudales promedios diarios simulados por el modelo se podrían obtener resultados satisfactorios para la obtención de caudales mensuales.
- Los resultados mostrados de los pronósticos a largo plazo podrían ser de mucha utilidad para la elaboración de los planes de cultivo y riego.

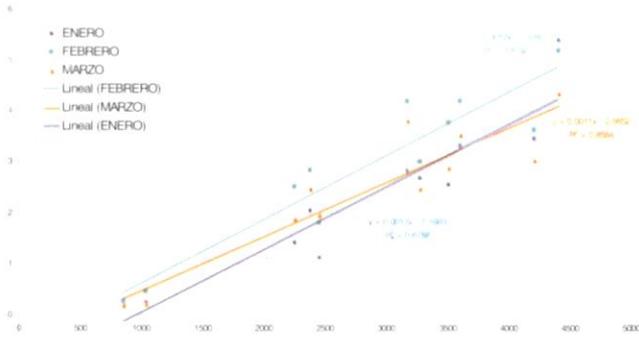


Figura 2. Gradientes mensuales Altitud vs Precipitación.

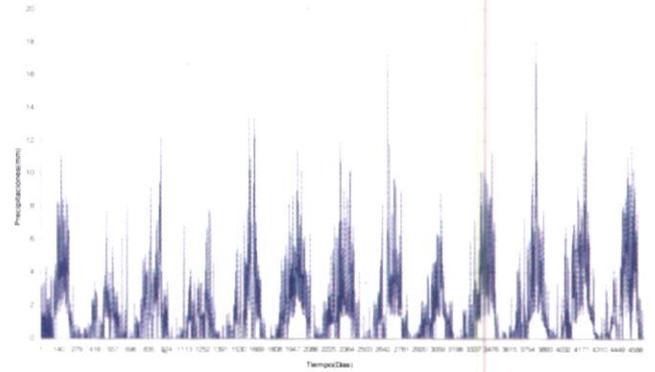


Figura 3. Precipitación media areal cuenca río Rímac 1988-2000.

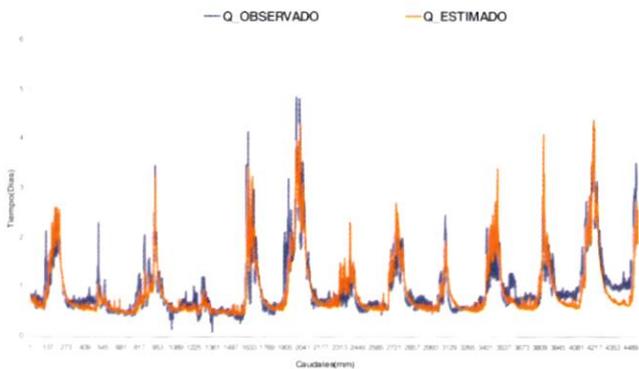


Figura 4. Calibración Gráfica 1988-1998.



Figura 5. Caudales pronosticados del río Rímac del 31-01 al 02-02 del 2001.

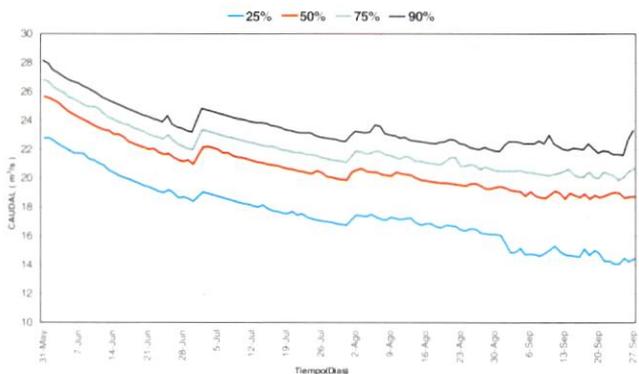


Figura 6. Caudales pronosticados del río Rímac hasta el 27 de setiembre del 2001.

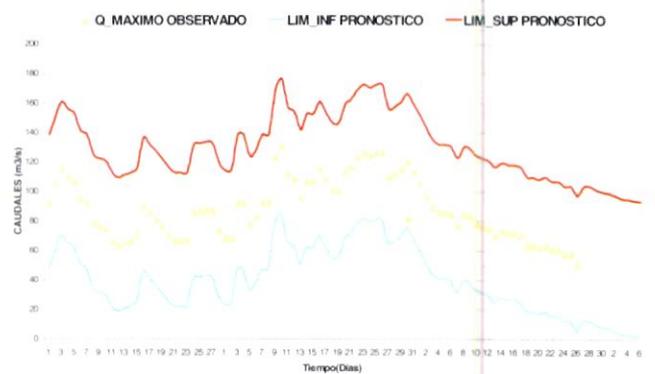


Figura 7. Caudales maximos pronosticados del río Rímac del 05-05 al 08-05 del 2001.

Recomendaciones

- Mejorar y ampliar la red de estaciones pluviométricas e hidrométricas de la cuenca del río Rímac con el propósito de realizar los modelamientos de la cuenca a una escala más pequeña a nivel de micro cuencas.
- Instalar estaciones automáticas en Casapalca, Milloc y Autisha para realizar operaciones a tiempo real en la cuenca alta del río Rímac.
- Utilizar el modelo HEC HMS para la formulación de un modelo hidrológico en la cuenca del río Rímac, el cual nos permitiría tomar en cuenta con mayor precisión la forma como se opera la cuenca, como por ejemplo las lagunas

reguladas.

BIBLIOGRAFIA

Amisial, R; Uzcátegui, G. 1979. Desarrollo y explotación de un modelo matemático del sistema hidrológico del Alto Apure en Venezuela. Cidiat, Venezuela.

Duque, Roberto. 1974. Modelo de simulación paramétrica Stanford IV. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras. Cidiat, Venezuela.

García, Martín, Amisial, R. 1976. Un modelo conceptual de simulación hidrológica. Cidiat, Venezuela.

Linsley, R; Kohler. 1977. Hidrología para ingenieros. Ed. Mc Graw Hill Latino Americana.



Miscelaneas en: Innovación Tecnológica y Transferencia de Conocimientos



FORMACION DE RECURSOS HUMANOS ESPECIALIZADOS EN MODELOS NUMERICOS DE PREDICCIÓN DE FENOMENOS ATMOSFERICOS Y OCEANICOS

Nicéforo Ita Maguiña*

Director del Centro de Capacitación del SENAMHI, Jesús María, Lima

El impacto de "El Niño" 97/98 ocasionó el decaimiento del PBI de 6,9 % en 1996 a 0,3 % en 1997, más de 100 mil viviendas en cinco departamentos fueron dañadas, hubo pérdidas en la infraestructura de irrigaciones y transporte, los servicios de educación y en otros tipos de infraestructura social. Ante este fenómeno el gobierno solicitó un préstamo al Banco Mundial y al Banco Interamericano de Desarrollo, ascendente a US \$ 430 millones, para atender las medidas de prevención y apoyo a la protección de inundaciones, y de emergencia, para la reconstrucción, reubicación de comunidades y familias propensas a inundaciones, y el apoyo financiero para reforzar la capacidad de observación y evaluación de los fenómenos atmosféricos y oceánicos.

Este apoyo financiero también ha permitido mejorar considerablemente el desarrollo de las ciencias de la atmósfera y

el océano en Perú, en los sistemas de vigilancia del tiempo y del clima. Estos avances están complementados con un programa de formación de recursos humanos especializados para facilitar la transferencia y adaptación de modelos de predicción numérica de fenómenos atmosféricos y oceánicos asociados con el fenómeno "El Niño". En el marco del proyecto: "Mejoramiento de la Capacidad de Pronóstico y Evaluación del fenómeno El Niño, para la Mitigación de Desastres en el Perú" se ha desarrollado un programa de entrenamiento intensivo en dos etapas: el Curso Básico, donde se impartieron materias de nivelación en: matemática, estadística, dinámica de fluidos geofísicos, meteorología, hidrología, oceanografía y ecología; luego se desarrolló el Curso Avanzado, compuesto por materias de especialización en métodos numéricos, modelos atmosféricos, oceánicos, global de la circulación, del



Participantes del IMARPE, IGP, DHN y el SENAMHI que asistieron al Curso Básico y Avanzado, un recurso humano calificado para desarrollar programas de investigación y desarrollo en el campo de la predicción numérica de fenómenos atmosféricos, oceánicos y los ecosistemas marinos.

* Ing. Meteorólogo. Director del Centro de Capacitación del SENAMHI.
e-mail: nitam@senamhi.gob.pe

clima, hidrológico y modelos biológicos pesqueros. Participaron 32 jóvenes profesionales procedentes del IMARPE, IGP, DNH y el SENAMHI.

Los cursos fueron dictados por docentes nacionales y extranjeros, de centros de investigación como el International Research Institute for Climate Prediction – IRI, el Centro de Previsión y Estudios Climáticos – CPTEC, Centro de Investigación de Oceanografía Física California universidades de

Maryland, Sao Paulo y Paraná. Dieciseis participantes que lograron las mejores calificaciones realizaron pasantías en el exterior en centros especializados en el campo de las ciencias de la atmósfera. También se desarrollaron cursos sobre mantenimiento preventivo de estaciones hidrometeorológicas automáticas y de radiosondaje, trasmisión de datos, procesamiento de base de datos y sistema de información geográfica.

Del 16 al 24 de agosto del 2001 se desarrolló en Lima el Curso Internacional: “Análisis Estadístico Aplicado a los Impactos del evento El Niño – Oscilación Sur” organizado por el SENAMHI – Centro de Capacitación. El curso fue dictado por la Dra. Alice Grimm, profesora de la Universidad Federal de Paraná de Brasil; tubo como objetivo proporcionar a los participantes las herramientas estadísticas que permitan detectar los impactos del fenómeno El Niño y La Niña, además de evidenciar la utilidad de la caracterización de estos impactos en la formulación de pronósticos climáticos a mediano plazo.

En este curso participaron treinta asistentes y los temas tratados fueron: Procesos atmosféricos y oceánicos asociados con el fenómeno El Niño, criterios para la determinación del evento El Niño y La Niña, control de datos, análisis de series y transformada de Furrier, análisis de series temporales de ciclos significativos y análisis de la precipitación. Al término del curso, se lograron avances importantes en las técnicas estadísticas de la evaluación del evento El Niño y La Niña, así como el intercambio de experiencias entre los participantes.



Dr. Alice Grimm, durante el dictado del curso



En la vista se observa los participantes del curso y al centro el Jefe del SENAMHI Mayor General FAP Gustavo Ebermann Tremolada y la Dra. Alice Grimm.

NOTA TECNICA SOBRE LOS PROGRESOS EN PREDICCIÓN NUMÉRICA HIDROMETEOROLÓGICA EN EL SENAMHI

Gabriela Rosas Benancio*

Centro de Predicción Numérica, SENAMHI, Jesús María, Lima

El SENAMHI cuenta desde fines del año 2000, con una oficina encargada de desarrollar modelos numéricos para el pronóstico del tiempo, clima y la hidrología de nuestro país, el Centro de Predicción Numérica (CPN), colocándose al nivel de los servicios meteorológicos más modernos del mundo.

Este centro nace en el marco del proyecto "Mejoramiento de la Capacidad de pronóstico y Evaluación del Fenómeno El Niño y Mitigación de desastres en el Perú", financiado por el Banco Mundial y con el apoyo de la Alta Dirección. Con ello se pretende contar con herramientas objetivas y útiles al momento de realizar el análisis para el pronóstico y, consecuentemente, prevenirnos de eventos extremos tales como el fenómeno "El Niño", el cual en el último episodio del 97/98 costó alrededor de 3,5 millones de dólares en pérdidas al país.



Figura 1. Centro de Predicción Numérica del SENAMHI.

El mejoramiento tecnológico brindado por dicho proyecto, ha permitido al SENAMHI incrementar su número de estaciones de trabajo con plataformas UNIX, en las cuales se ejecutan el procesamiento de datos y la generación de información realizada por los modelos numéricos usados en el CPN. En la actualidad contamos con 6 "workstations" Compaq Alpha: 3 DS20E, 2 ES40 y una XP1000.

Los modelos de tiempo, climáticos e hidrológicos, tienen

el objetivo común de detectar en corto, mediano y largo plazo los posibles efectos que la presencia de un evento que como el fenómeno "El Niño" puede tener sobre las condiciones atmosféricas de nuestro país, ya sea pronosticando en dónde y con qué intensidad se presentarían las lluvias más fuertes, o detectando zonas potencialmente inundables ante el incremento de los caudales de los principales ríos peruanos, etc. Los productos de los modelos numéricos tienen además una amplia variedad de aplicaciones de gran confiabilidad en las áreas de agricultura, transporte, comercio, etc., siendo de gran utilidad en la planificación de estas actividades.

MODELOS DE TIEMPO

Modelo ETA-Senamhi

El modelo ETA es original de Yugoslavia, Universidad de Belgrado y fue desarrollado por el National Centers for Environmental Prediction (NCEP) de los Estados Unidos.

La implementación del modelo regional ETA en el SENAMHI, se da en marzo de 1999, corriendo a manera de prueba por varios meses en la estación de trabajo XP1000 ALPHA. Este modelo está corriendo operacionalmente una vez al día desde julio del 2000 en dos resoluciones horizontales: 25 km en el dominio Perú y 48 km en el dominio Sudamérica y utiliza las salidas de los modelos americanos de aviación (AVN) y WAFS como condiciones iniciales y de frontera.

La obtención y descarga de las condiciones iniciales dura aproximadamente cinco horas y media, mientras que el tiempo de procesamiento es de una hora. Se tiene planeado que a fines de este año deberá correr en cuatro procesadores en paralelo; para ello se están realizando las pruebas necesarias, habiéndose instalado ya en una "workstation" ES40; esto reducirá el tiempo de procesamiento aproximadamente a la cuarta parte.

Asimismo, la adaptación del modelo ETA a la topografía de los Andes, representaba un problema significativo en el cálculo de la precipitación convectiva pronosticada; gracias a la asesoría de Dr. Mesinger (NCEP), autor de la coordenada vertical "eta", se mejoró el pronóstico de lluvias acumuladas con valores más cercanos a los reales.

Las salidas son visualizadas con el software GRADS, desarrollado por el Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies (COLA), y publicadas en la web del SENAMHI diariamente.

* Ing. Meteorólogo del Centro de Predicción Numérica del SENAMHI.
e-mail: grosas@senamhi.gob.pe

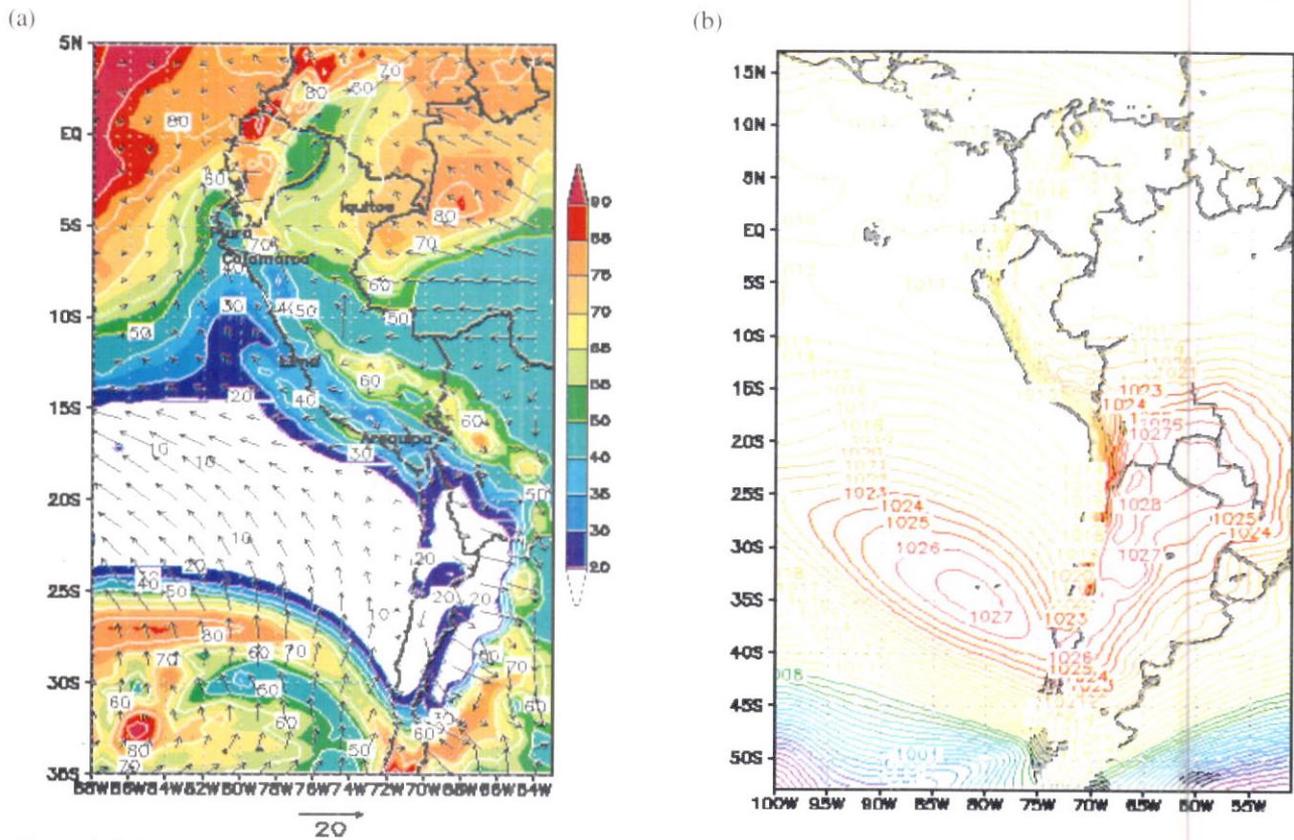


Figura 2. Salidas del modelo ETA-SENAMHI usando GRADS. (a) Campo de vectores de viento y humedad relativa en el dominio Perú y (b) campo de presión a nivel del mar en el dominio Sudamérica.

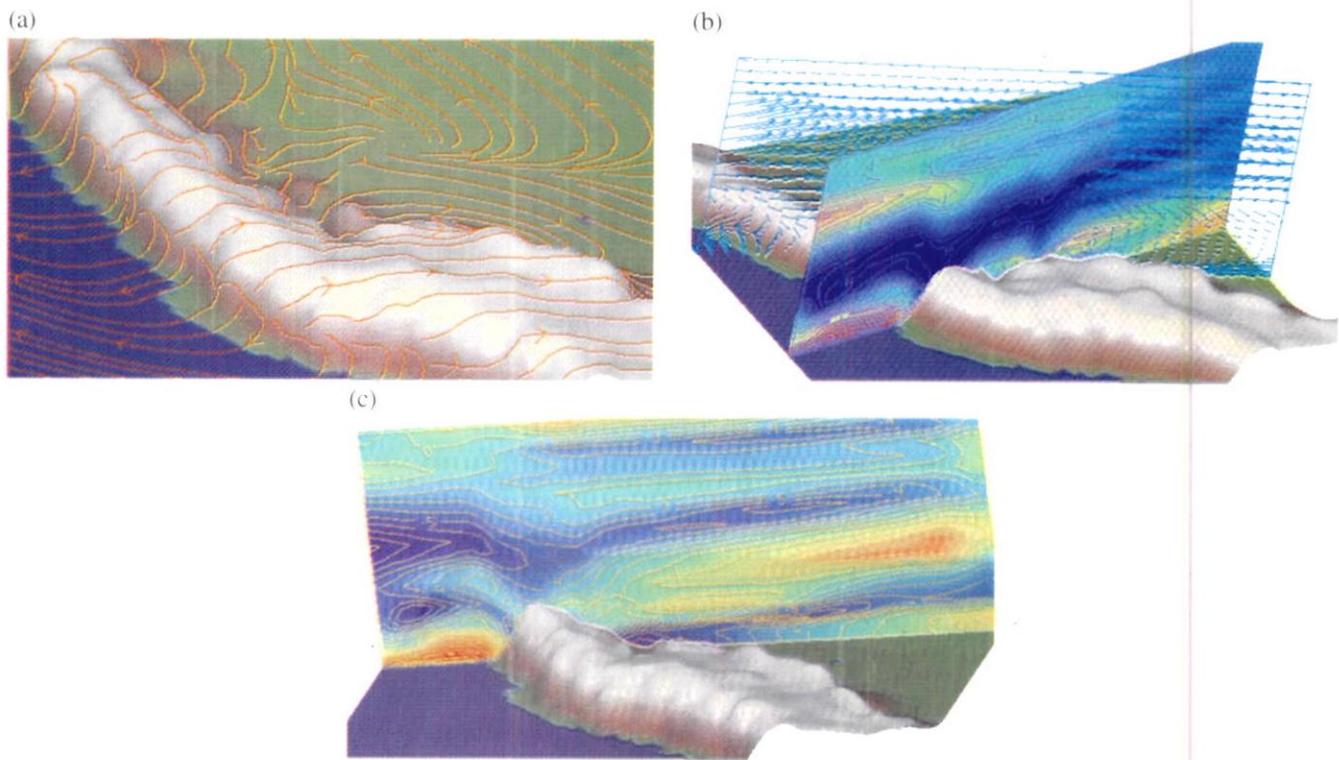


Figura 3. Salidas del modelo RAMS en Vis5. (a) Líneas de corriente superficial, (b) cortes verticales de vectores de viento y velocidad meridional y (c) el mismo corte vertical desde otra perspectiva.

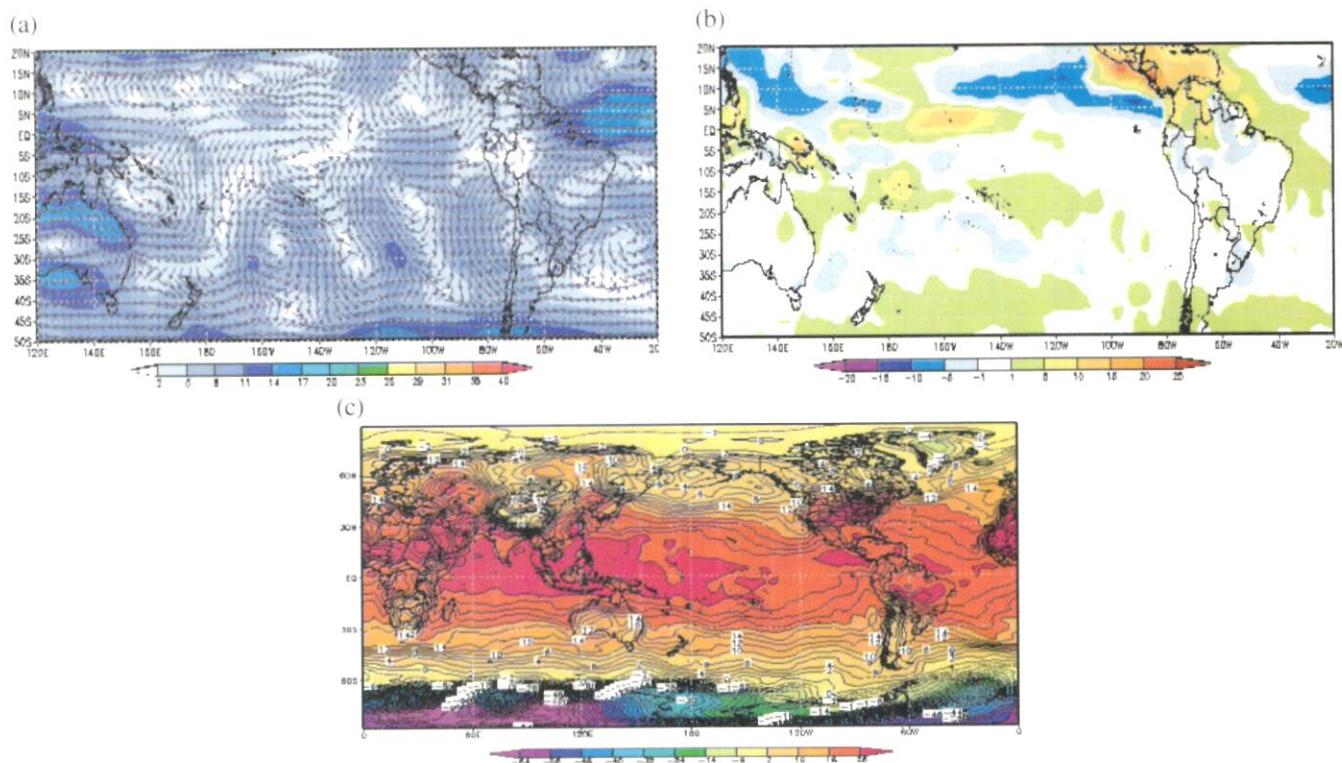


Figura 4. Salidas de pronóstico del modelo CCM3. (a) Anomalia de viento mensual abril 2002, (b) anomalia de temperatura superficial agosto 2001 y (c) temperatura del aire mayo 2001.

Regional Atmospheric Modeling System (RAMS)

El modelo RAMS fue desarrollado entre la Universidad de Colorado (EEUU) y la División ASTER de la Mission Research Corporation (EEUU) del cual contamos con la licencia de operación. El RAMS es un modelo que permite aumentar la resolución hasta menos de un kilómetro, aplicándose en la simulación de la dinámica atmosférica de áreas muy reducidas, desde ciudades hasta plantas industriales. En la actualidad, se encuentra semioperativo y ha sido usado para estudios específicos del servicio en áreas pequeñas con muy buenos resultados. Las condiciones iniciales y de frontera son tomadas del modelo AVN, asimismo, el esquema de asimilación numérica que posee permite incluir información de la red de estaciones hidrometeorológicas automáticas y sondaje con las que cuenta el SENAMHI. Además de GRADS, las salidas del modelo son visualizadas con Vis5D, (programa desarrollado en el Space Science and Engineering Center - Universidad de Wisconsin), el cual permite generar campos en tres dimensiones, muy útil en tareas de evaluación sinóptica.

MODELO CLIMATICO

Community Climate Model Vs. 3 (CCM3)

El modelo CCM3, el cual es un modelo climático global acoplado océano-atmosférico-tierra, consta de dos modelos

integrados en uno solo, al cual se le inicializa con temperaturas de agua de mar. Fue desarrollado por el National Center for Atmospheric Research (NCAR) de los EEUU. El modelo fue instalado por el Dr. Graham del Hydrologic Research Center (HRC) de EEUU, debido a la importancia de contar con un modelo que podría permitir pronosticar con meses y hasta años de anticipación la eventual presencia de un evento extremo de escala global como el fenómeno El Niño o La Niña, desde fuertes tormentas a persistentes sequías, etc., permitiendo así la planificación de las principales actividades económicas del país. Actualmente, posee una resolución horizontal de 2.8° de Latitud y Longitud, y es inicializado con temperatura de agua de mar pronosticada por NCEP. Se han realizado algunas corridas de prueba para años con eventos El Niño, logrando buenos resultados. Sin embargo, es necesario emplear técnicas numérico-estadísticas para mejorar la resolución espacial de este modelo utilizando el "downscaling" con el modelo RAMS y reducir la incertidumbre con el uso de múltiples corridas ensambladas ("ensembles").

MODELOS HIDROLOGICOS

Modelo Sacramento-HFS

Paralelamente en el CPN, con asesoría del Dr. Georgakakos (HRC), se implementó y adaptó un sistema de pronóstico hidrológico, el "Hydrological Forecasting System" (HFS) del

HRC y utilizado en EEUU por el National Weather Service. Este modelo está operativo desde finales del 2000, y en la actualidad genera caudales diarios y máximos instantáneos pronosticados con una anticipación de hasta 5 días para la cuenca del río Rímac, uno de los más importantes ríos en Lima, la ciudad capital, esperándose implementar en el futuro el sistema para otras cuencas importantes del país. Este modelo hidrológico utiliza pronósticos de lluvias del modelo ETA-SENAMHI.



Figura 5. Pronóstico del Modelo Sacramento-HFS para 3 días de caudales diarios del río Rímac

Modelo Sacramento-EHF

Fue instalado y configurado con asesoría de la Dra. Carpenter (HRC), este es un modelo de pronóstico a largo plazo, el cual utiliza el Modelo Sacramento HFS con una metodología de pronóstico ensamblado. Actualmente, genera salidas para cuatro meses de validez de los caudales diarios del río Rímac y se está implementando de manera similar también para el río Piura.

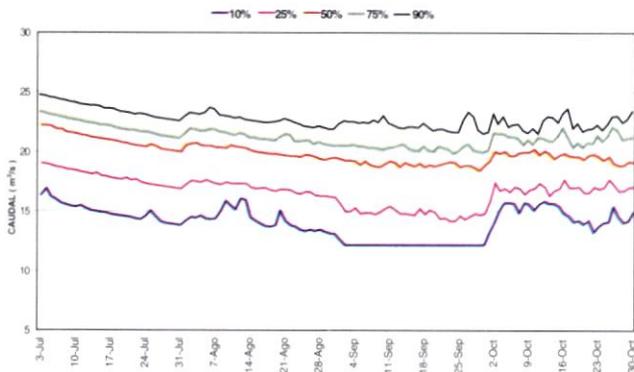


Figura 6. Pronóstico del Modelo Sacramento-EHS para 120 días de caudales diarios para el río Rímac.

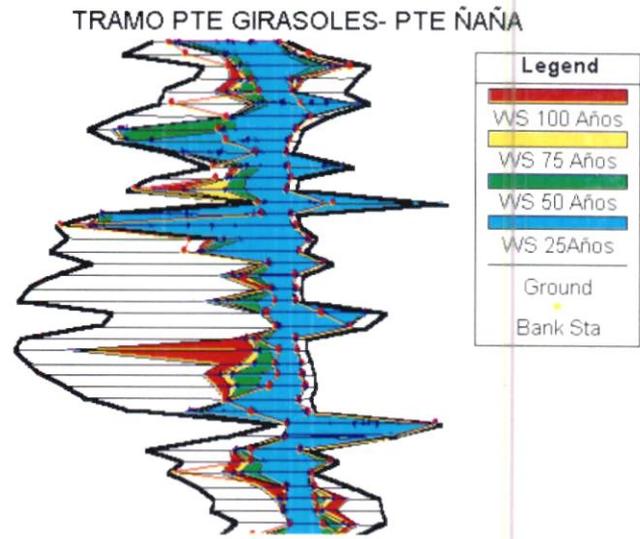


Figura 7. Simulación del Modelo HEC RAS de áreas inundables en el tramo Pte. Girasoles-Pte. Ñaña del río Rímac

Modelo HEC RAS

El HEC RAS fue desarrollado por el Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center de los EEUU. Este modelo realiza simulaciones de áreas inundables, detección de zonas de desborde, etc. Esta información servirá para la efectiva administración de recursos hídricos así como para mitigar los efectos de desastres naturales en zonas vulnerables

Además de los modelos hidrometeorológicos, hemos incursionado en la implementación de modelos para la dispersión de contaminantes, con la adquisición por parte del SENAMHI del código y licencia del modelo Hybrid Particle and Transport Model (HYPACT) desarrollado por ASTER. Dicho modelo trabaja en forma conjunta con el modelo RAMS, a fin de obtener un pronóstico de la dispersión de las diferentes sustancias dispersadas en nuestras zonas urbanas e industriales, siendo esto muy útil para el control y monitoreo de la calidad del aire en nuestro país.

Las asesorías internacionales recibidas como parte del Proyecto del Banco Mundial, nos han permitido avanzar rápidamente en el desarrollo de la modelación numérica; adicionalmente, se brindaron oportunidades para la realización de pasantías en instituciones de prestigio internacional en el área de modelación, constituyendo un aporte significativo como transferencia de conocimiento para la continua mejora de los modelos implementados. Todo este esfuerzo se verá reflejado en la optimización de los productos que el SENAMHI ofrece, lo cual conllevará a una mejor toma de decisiones en los diferentes sectores productivos y al desarrollo económico y social de nuestro país cumpliendo la misión de brindar calidad y precisión a la comunidad.

SUBSISTEMA DE PROCESAMIENTO DE DATOS

Alberto Pizarro Pereyra*

Oficina General de Estadística e Informática, SENAMHI, Jesús María, Lima.

El desarrollo informático exhibido por el SENAMHI durante los últimos años, evidencia importantes avances y transformaciones para la Institución. Cualquier análisis independiente verificaría lo actualizada y completa de la actual plataforma tecnológica de la Institución. La misma plataforma está hoy, en parte, en el ámbito de desarrollo. De hecho esta afirmación se destaca entre los logros más relevantes de los años 1999 – 2000, los avances en términos de plataforma de Tecnologías de Información producto del proyecto “Mejoramiento de la Capacidad de Pronóstico y Evaluación del Fenómeno “El Niño” para la Prevención y Mitigación de Desastres en el Perú” con el Banco Mundial. De esto se pudo deducir en resumen los problemas encontrados antes del proyecto:

- Los sistemas de observación transmisión, percepción y distribución de los datos no estaban tecnológicamente al día.
- Datos históricos que abarcan los últimos 50 años, pero que no estaban debidamente organizados en sistemas modernos de bases de datos.
- Inadecuado uso de plataformas y software técnico
- No existió una tecnología geospacial para el tratamiento de imágenes.
- No integración en los procesos técnicos ni uniformidad de criterios al desarrollo de sistemas de información.
- Hubo una Red informática pequeña y congestionada.

Sobre estos problemas encontrados la apertura económi-

SISTEMA DE PROCESAMIENTO DE DATOS

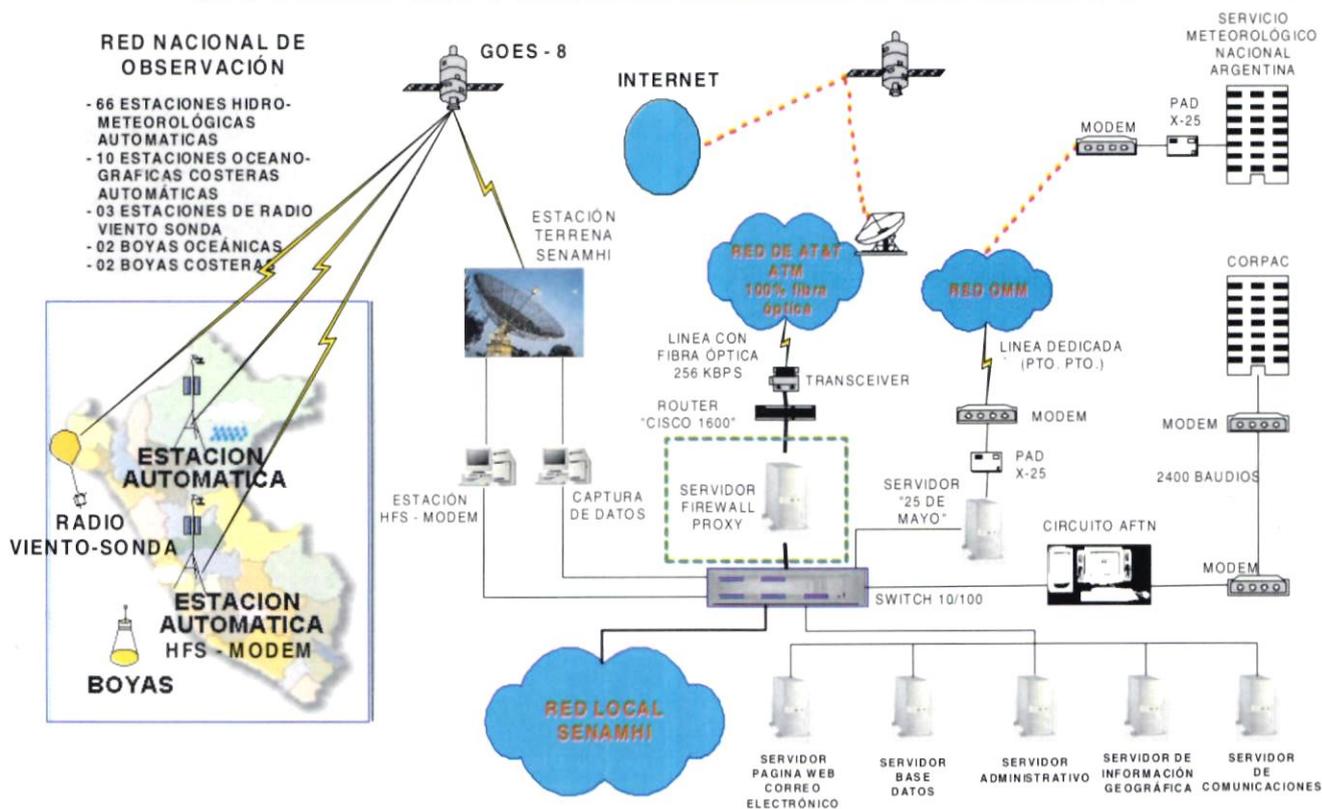


Figura 1. Diagrama del Sistema de Procesamiento de datos.

* Lic. Computación e Informática. Asesor de la Oficina General de Estadística e Informática, SENAMHI.
e-mail: apizarro@senamhi.gob.pe

ca en cumplimiento del proyecto nos permitió la adquisición del equipamiento adecuado para el desarrollo técnico científico del SENAMHI. Mediante un análisis situacional describi-

mos en la siguiente imagen la distribución del subsistema de procesamiento de datos y el flujograma de sistema de información hidrometeorológica.

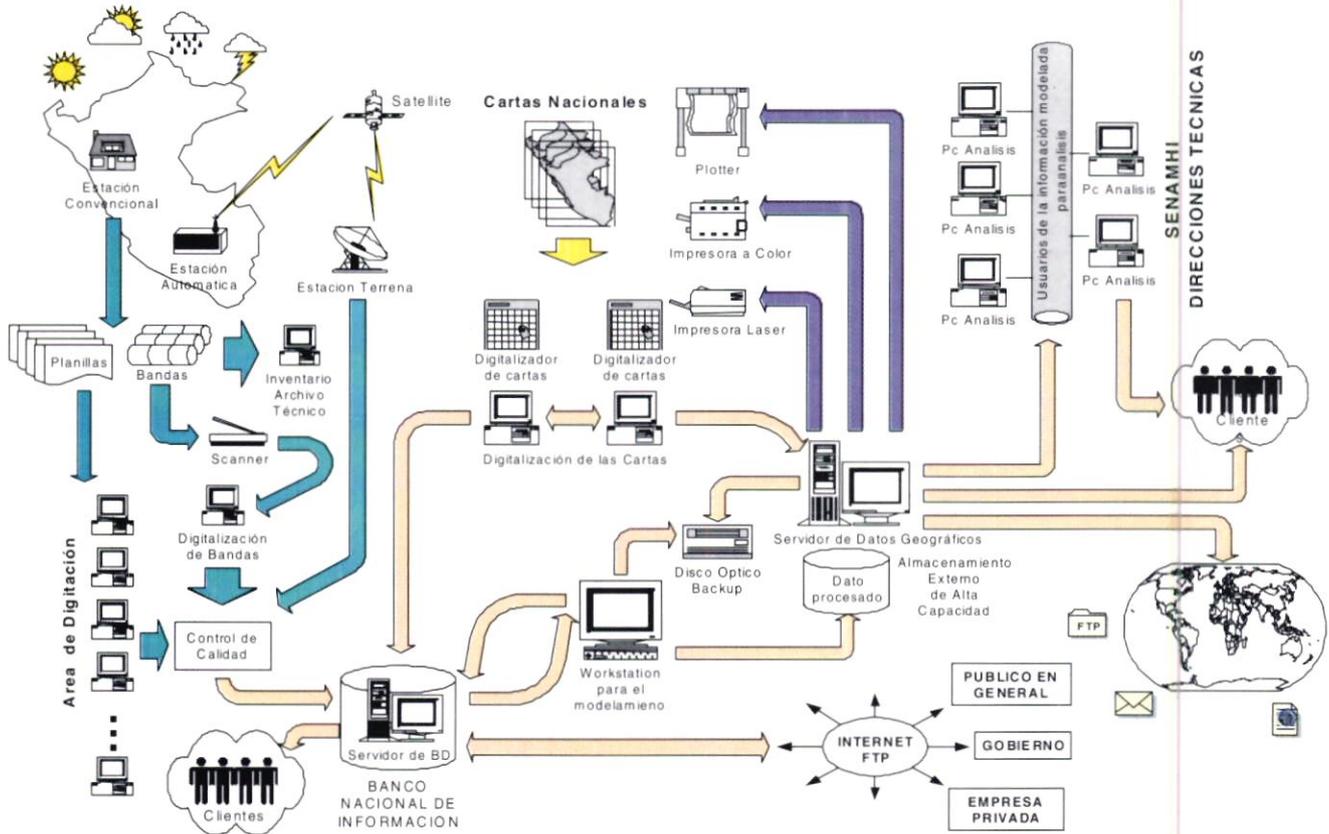


Figura 2. Flujograma de la automatización de la Información Hidrometeorológica.

Se mejoró la infraestructura física de la institución y la adquisición de recursos humanos con alta experiencia para el desarrollo de sistemas e ingresos de datos.

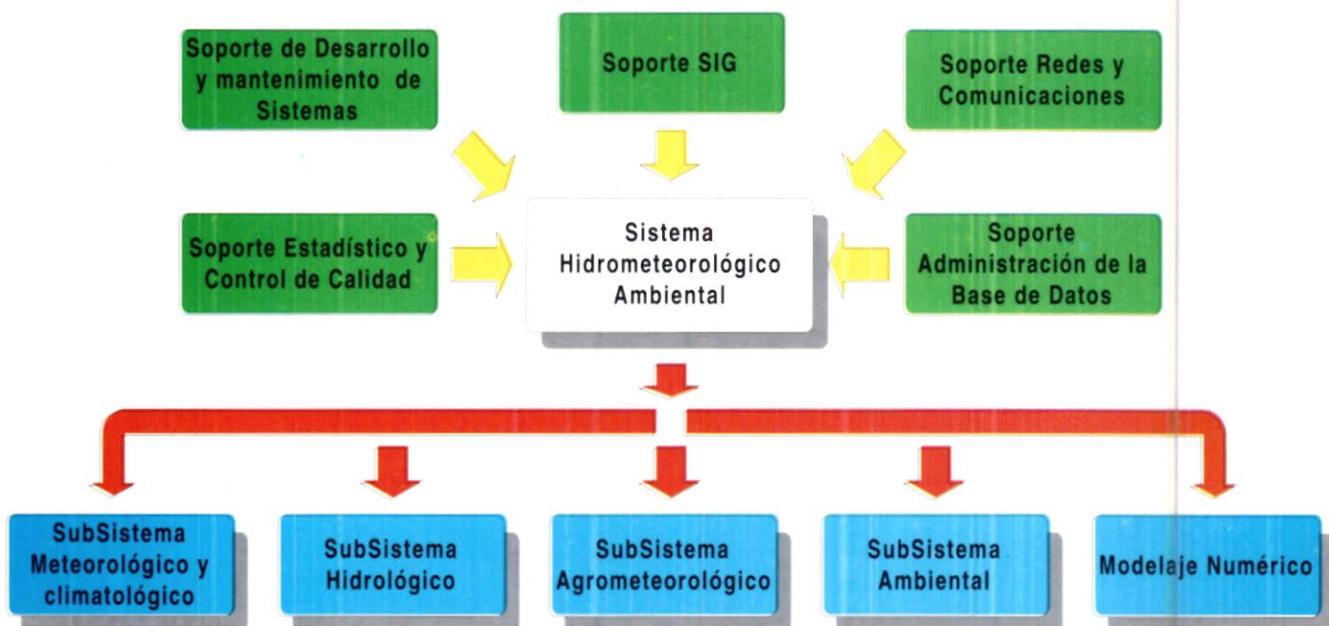


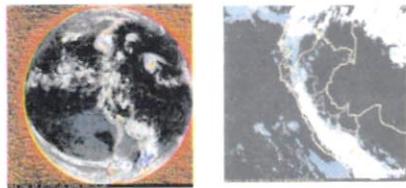
Figura 3. Diagrama Funcional del Sistema Hidrometeorológico Ambiental.

PROCESAMIENTO DE DATOS METEOROLOGICOS

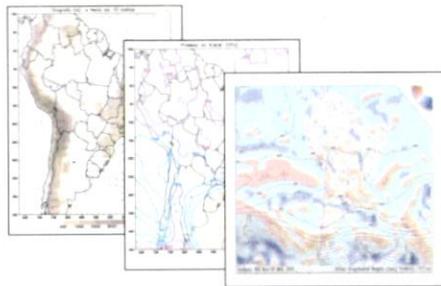
INFORMACION HIDROMETEOROLOGICA



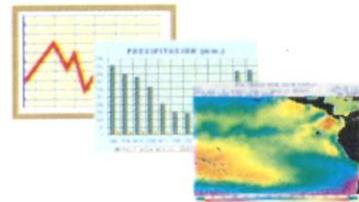
INFORMACION SATELITICA



MODELOS DE PRONOSTICO



INFORMACION CLIMATOLOGICA



SERVICIO DE PRONOSTICO



ALERTAS



PRONOSTICO



USUARIOS

ORGANISMOS GUBERNAMENTALES

DEFENSA CIVIL

MEDIOS DE COMUNICACION

DIRECCIONES REGIONALES

EMPRESAS PARTICULARES

PAGINA WEB



Distribución y organización del Subsistema de Procesamiento de Datos

a. Sala de digitación

Actualmente es la encargada de digitar y verificar los datos de la planilla hidrometeorológica histórica y pasarlos a medios magnéticos para su control de calidad.



Figura 4.

b. Banco de Datos Hidrometeorológicos

La modernización del banco de datos se realizó adecuando un ambiente especial para el resguardo de la información hidrológica y meteorológica con las últimas técnicas de infraestructura bibliotecaria y se capacitó al personal encargado.



Figura 5.

c. Laboratorio SIG

Se implementó para completar las necesidades del proyecto, el laboratorio de Información Geográfica cuenta con equipos de última generación y software especializado. Actualmente se encuentra digitalizando todo el Perú a una escala 1/100,000 contemplando las condiciones físicas que requieran los modelos numéricos.



Figura 6.

d. Sala de Servidores

Actualmente la sala de servidores del SENAMHI cuenta con siete servidores: Servidor FIREWALL, de Internet, de correo electrónico, de base de Datos Hidrometeorológica, de base de datos Geográfica, de base de datos administrativa y de Comunicaciones, que cuentan con plataformas LINUX y UNIX Solaris y son el corazón de la LAN de la Institución. Está a cargo de un administrador de red y cuenta con el apoyo de un WEBMASTER.

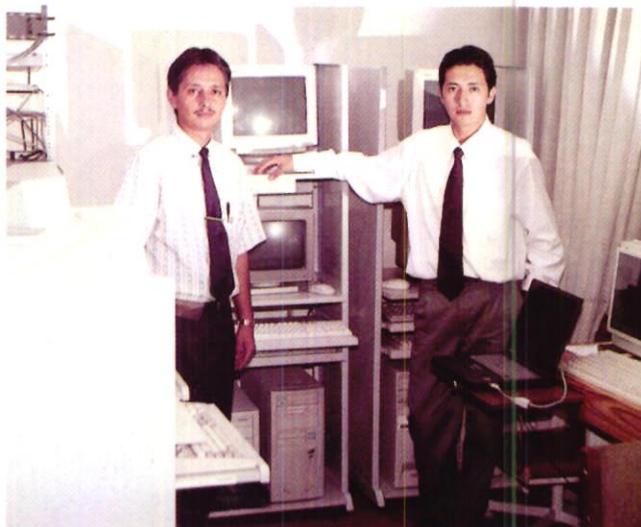


Figura 7.

e. Análisis y Desarrollo Informático

Es el recurso humano especializado en la planificación informática, desarrollo de sistemas de información, administración de Base de Datos y diseño de paginas Web; siendo este personal el soporte lógico de toda la infraestructura informática.

f. Análisis, Desarrollo Estadístico y control de Calidad

Estos recursos humanos son los especialistas en desarrollar y conducir el Sistema Nacional de Información Estadística, Meteorológica, Hidrológica y de Medio Ambiente. Brinda la asistencia técnica en materia de metodología y procesamiento estadístico.



TIEMPO, CLIMA Y AGUA

**REVISTA TECNICO-CIENTIFICA
IMPRESO EN LAS INSTALACIONES DEL SENAMHI
OCTUBRE 2001**

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA

Sede Central: Jr. Cahuide N° 785, Jesús María - Lima 11

Casilla Postal 1308. Telf.: (51-1) 472-4180 Fax: (51-1) 471-7287 e-mail: senamhi@senamhi.gob.pe

Página web: <http://www.senamhi.gob.pe>