

EVALUACION Y OPERACION DE DOS SISTEMAS PANTANOSOS ARTIFICIALES EN GUYANA

RICARDO A. SMITH

Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Universidad Nacional de Colombia, Medellín

JOHN DE BEER

Ministry of Agriculture, Hydraulics Division
Georgetown, Guyana

JERRY LOCHAN

University of Guyana
Georgetown, Guyana

RESUMEN

Dos de los esquemas de irrigación y drenaje más importantes de Guyana son aquellos que reciben agua de los sistemas pantanosos artificiales llamados Boerasirie y East Demerara. La irrigación se hace mediante redes de canales que toman agua de los pantanos y el drenaje se hace por canales que drenan al océano Atlántico usando compuertas y bombas. Mediante un estudio de balance de aguas de los sistemas pantanosos artificiales se evaluaron estos sistemas para definir las posibilidades de rehabilitar más tierras para riego y se efectuaron análisis de operación para establecer las pautas generales a este respecto. El estudio se efectuó en términos probabilísticos. Se presenta la metodología utilizada, los resultados obtenidos y algunas conclusiones y recomendaciones. La evaluación del potencial se realizó a nivel mensual con series de lluvia y clima generadas estocásticamente para alimentar un modelo de balance de aguas de los sistemas y a un modelo de demandas, para evaluar la confiabilidad del sistema para atender la demanda. Se utilizaron varias opciones de demandas y a las series obtenidas de confiabilidad se les ajustaron distribuciones de probabilidades que permitieron describir adecuadamente la confiabilidad de los dos sistemas. Utilizando un esquema similar pero a nivel diario se realizó el análisis de la operación de ambos sistemas. En este caso se usaron series históricas de larga duración de clima y lluvia que sirven de entrada al modelo SSARR de lluvia-escurrimiento y a un modelo de demandas. Se discute el uso y acoplamiento de ambos modelos a un modelo de operación diaria de cada sistema, basado en balance de aguas usando variantes de la regla normal de operación que permiten niveles de racionamiento cuando los sistemas entran en situación crítica. Para la evaluación de la operación se usan varios indicadores como confiabilidad, recuperabilidad y varias medidas de vulnerabilidad. Uno de los resultados obtenidos más importantes es que los valores de confiabilidad obtenidos en la evaluación de la operación (nivel mensual) y en el análisis de la operación (nivel diario) son prácticamente iguales, usando metodologías de modelamiento completamente distintas.

ABSTRACT

Two of the most important drainage and irrigation systems in Guayana are the ones which receive water from the Boerasirie and East Demerara Conservancies. Drainage is provided by a system of canals that drain into the Atlantic Ocean regulated by sluices and pumping facilities. Irrigation is provided by a system of canals that take water from the conservancies. A water balance study in a probabilistic basis was conducted to evaluate conservancies potential to supply water to actual and new agricultural user and to analyze the operational policies of each conservancies. The potential evaluation methodology was done at the monthly level and uses stochastically generated climatic and precipitation series as input into a water balance model of the conservancies and into a water demand model. With the resulting delivery and the corresponding water demand series, reliability was estimated. Several water demand options were used and reliability was estimated for each one. A probability distribution was fitted to the reliability series which allows to adequately describe reliability of both systems. Some conclusions and recommendations are also presented. Using a similar procedure but at a daily level a methodology for the operational analysis of both systems was developed. In this case long term historical series of precipitation and climatic variables are used as inputs into a rainfall-runoff model (SSARR model) and into a water demand model. These two models are discussed in detail. Both models are used as inputs into a water balance daily operational model that allows several rationing levels. To evaluate the operational rule some operational evaluators such as reliability, recoverability, and several vulnerability indexes are used. One of the most important results is that the obtained reliabilities are the same in the potential evaluation analysis (monthly level) and in the operational analysis (daily level). These two analysis uses complete different methodologies.

1. INTRODUCCION

Guyana es un país ubicado en la esquina noreste de

Suramérica cuya economía ha sido altamente dependiente de la agricultura, especialmente del cultivo de la caña del azúcar y del arroz, sobre los que se basan los exiguos

ingresos de divisas del país. Los dos esquemas de riego y drenaje más importantes de Guyana son abastecidos por los sistemas pantanosos artificiales (SIPA) llamados Boerasirie y East Demerara. Estos esquemas están compuestos por canales que toman agua de los sistemas pantanosos, riegan los campos y luego los drenan llevando el agua al océano. Los esquemas están regulados por compuertas y algunas estaciones de bombeo. Como sistemas pantanosos artificiales se denomina a aquellos embalses construidos por el hombre que tienen una profundidad pequeña (profundidades máximas aproximadamente de 3 metros) y cubren una área relativamente grande que representa un hábitat favorable para el desarrollo de la vegetación y fauna típica de los pantanos naturales. Estos SIPA se construyen excavando un canal principal a lo largo del perímetro y usando el material de la excavación para construir la presa del sistema. Su apariencia es la de una gran estanque irregular de baja profundidad. Estos embalses, en un tiempo relativamente corto y si no se hace un mantenimiento continuo, tienen toda la apariencia de un pantano natural. En la Figura 1 se presenta la ubicación general de los sistemas y en la Tabla 1 las características principales de los mismos.

A solicitud de la División de Hidráulica del Ministerio de Agricultura de Guyana se adelantó un estudio de balance de aguas en ambos SIPA con los siguientes dos objetivos:

- a. Evaluar el potencial de ambos sistemas en términos probabilísticos para abastecimiento de agua
- b. Efectuar recomendaciones sobre la operación de ambos sistemas.

La evaluación del potencial se efectuó a nivel mensual mediante el uso de un modelo estocástico multivariado de lluvia y clima (temperaturas, radiación solar y humedades relativas y velocidad del viento) acoplado a un modelo de lluvia-escurrentía y a un modelo de estimación de demandas. Las recomendaciones sobre la operación de los dos sistemas se basaron en una simulación a nivel diario usando series históricas de larga duración (40 años) de lluvia y clima que suministran información a un modelo de lluvia-escurrentía y a un modelo de estimación de demandas. En este trabajo se presentan las metodologías utilizadas y los resultados obtenidos para la evaluación del potencial y para el análisis de la operación de ambos SIPA.

2. ANALISIS HIDROLOGICO

El análisis hidrológico realizado consistió en el estudio de

las series hidrológicas de precipitación y clima (temperaturas, humedades relativas, velocidad del viento y horas de radiación solar) a nivel mensual y diario hasta llegar a producir series aceptables sin ningún dato faltante en el período de análisis finalmente escogido.

El procedimiento de análisis hidrológico incluyó:

- Estimación de las características estadísticas más importantes usando la información histórica.
- Análisis de homogeneidad de cada serie (detección de posibles cambios y tendencias).
- Selección de las series por utilizar.
- Selección del período de análisis.
- Extensión y relleno de datos faltantes.
- Cálculo de las características estadísticas finales.

Para la realización del estudio se dispuso de 13 y 8 estaciones de precipitación total diaria para los SIPA East Demerara y Boerasirie, respectivamente, y una estación climatológica completa ubicada en Georgetown y que fue utilizada para ambos SIPA.

La información de lluvia y clima disponible se encuentra a nivel diario, con algunas estaciones con registros de más de 100 años y otras con algo más de 10 años. A partir de la información diaria se calcularon los datos mensuales. Se decidió incluir en el análisis las series climáticas disponibles dado que se utilizó el modelo de Penman (Shaw, 1988) para el cálculo de la evapotranspiración y posteriormente de la demanda de agua para riego. Aunque esto aumenta considerablemente el número de variables por considerar (5 variables adicionales en el modelo estocástico), los resultados son más confiables generando variables básicas (climáticas) y no variables transformadas (evapotranspiración).

Las características estadísticas históricas fueron calculadas para posteriormente comprobar que los procesos de extensión y relleno de datos no introdujeran cambios en las características estadísticas básicas y que las series generadas con modelos estocásticos preservaran las características estadísticas originales. A nivel mensual se calcularon medias y desviaciones típicas periódicas, correlogramas anuales y mensuales, correlogramas periódicos, y correlaciones cruzadas entre la series. Dado que a nivel diario se manejan volúmenes de información mucho mayores y que no se realizó modelamiento estocástico, las características estadísticas calculadas a este nivel fueron bastante simples: medias y desviaciones típicas periódicas. El análisis de homogeneidad se realizó a nivel mensual. Se asumió que si la serie era adecuada a nivel mensual era igualmente adecuada a nivel diario (las series a nivel mensual son obtenidas usando las respectivas

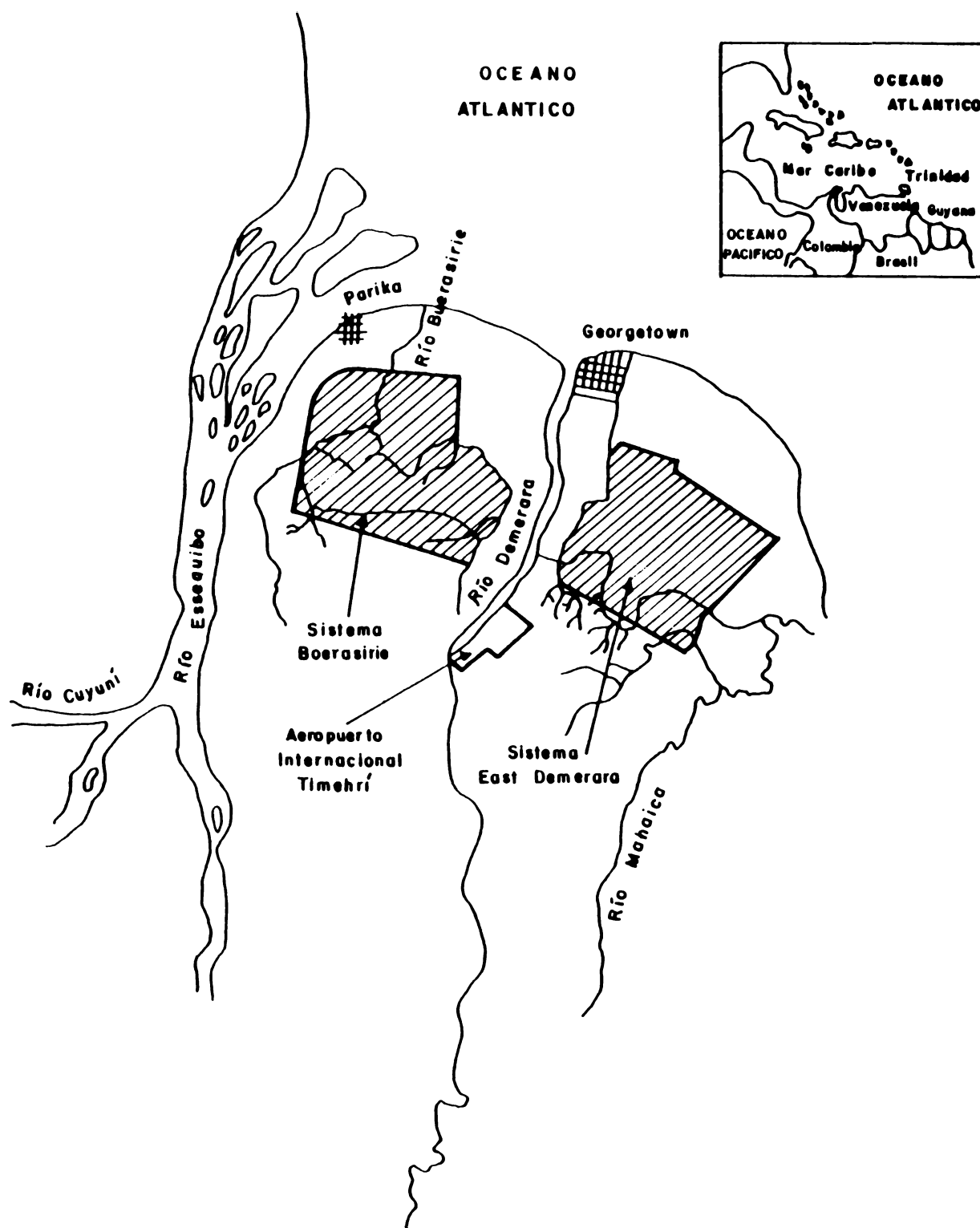


FIGURA 1. Ubicación General de los Sistemas Pantanosos Artificiales en Guyana.

series a nivel diario).

Tabla 1. Características de los Sistemas Pantanosos Artificiales Boerasirie y East Demerara.

Característica	Boerasirie	East Demerara
Longitud de Presa	44 Millas	44 Millas
Area Inundada	100 Millas ²	130 Millas ²
Profundidad Máxima	10 Pies	7 Pies
Máximo Volumen de Agua Usable	10.3x10 ⁹ Pies ³	11.6x10 ⁹ Pies ³
Número de Extracciones en Uso	17	16
Fecha de Puesta en Servicio	1950	1890-1900
Area de la Cuenca	130 Millas ²	200 Millas ²
% del Area del Embalse cubierto por vegetación	98%	98%
Estado de la Presa	Regular	Mala
Usos	Riego	Riego y Agua para Georgetown
Tributarios	Ríos y quebradas de existencia sólo durante las lluvias	Ríos y quebradas de existencia sólo durante las lluvias

El análisis de homogeneidad trata de definir si las series disponibles presentan cambios o tendencias que las podrían descalificar para ser usadas en análisis posteriores a menos que se remueva la forma de no homogeneidad.

Este análisis incluyó la realización de pruebas de detección de cambio y tendencias de cada serie a nivel mensual. Para detectar cambios en la media se realizaron las pruebas de Friedman, T, T Modificada, Kruskal-Wallis y Análisis de Doble Masa. Para detectar cambios en la varianza se hicieron las pruebas F y F Modificada. Para detectar tendencias en la media se hicieron las pruebas T, Hotelling Pabst, Mann-Kendall y Kendall Periódico. Para detectar tendencias en la varianza se hicieron las pruebas T, Hotelling Pabst y Mann-Kendall sobre la serie de varianzas anuales. Descripciones de estas pruebas se pueden encontrar en Salas y otros (1992). Estas pruebas dieron resultados consistentes e indicaron que la mayoría de las series disponibles eran adecuadas. Los resultados obtenidos llevaron a seleccionar 10 series de precipitación y cinco series climáticas para el SIPA East Demerara y 6 series de precipitación y las mismas series climáticas para el SIPA Boerasirie.

Analizando la disponibilidad de información de cada serie para proceder al relleno y extensión de datos faltantes, se decidió escoger como período de análisis a nivel mensual el período de 1916 a 1990, para un total de 75 años. Todas las series fueron rellenadas y/o extendidas para esos períodos de análisis. Como período de análisis a nivel

diario fue inicialmente escogido el período de 1940 a 1990 para un total de 51 años de datos diarios. Sin embargo, dificultades posteriores de capacidad del computador para manejar el modelo de demanda a nivel diario obligaron a bajar el período de análisis a 1946-1990 para un total de 45 años en el caso de SIPA Boerasirie y a 1961-1990 para un total de 30 años en el caso del SIPA East Demerara.

Para el relleno y extensión de datos faltantes se usaron procedimientos de regresión y correlación y el uso de mecanismos de promedios ponderados. A nivel mensual se trató, siempre que fuera posible, de usar regresión y correlación para el relleno y extensión de datos, y se usaron en este caso varios esquemas diferentes tratando de escoger los que mejores resultados daban. Se probaron 10 esquemas diferentes en el caso de regresión y correlación (regresión simple y múltiple período a período, entre series normalizadas, usando los datos concurrentes, anteriores y posteriores, etc.). Los procedimientos de promedios ponderados sólo se usaron cuando no era posible el uso de métodos de regresión y correlación.

A nivel diario, al igual que en el caso mensual, para el relleno y extensión de datos faltantes se usaron procedimientos de regresión y correlación y el uso de mecanismos de promedios ponderados. Se trató, siempre que fuera posible, de usar regresión y correlación para el relleno y extensión de datos. La correlación a nivel diario es muy baja en los meses de transición invierno-verano o verano-invierno y hubo entonces que recurrir con mayor

frecuencia a los procedimientos de relleno con ponderaciones de valores en estaciones vecinas en el nivel diario que en el nivel mensual. El esquema de correlación y regresión utilizado fue el de regresión y correlación simple y múltiple día a día, correlacionando los valores de un día específico para todos los años en las estaciones de interés, incluyendo algunas veces datos concurrentes, anteriores, posteriores, anteriores y posteriores, etc. al día considerado. Procedimientos de correlación y regresión entre series diarias continuas normalizadas no fueron utilizados por considerarse que no tienen sentido físico a nivel diario.

El resultado final de este análisis fue la obtención de series de precipitación y clima a nivel mensual y diario sin datos faltantes para el período seleccionado. A las series obtenidas (extendidas y rellenadas) se les calcularon las mismas características estadísticas calculadas para las series históricas y se compararon entre sí para analizar la bondad de los procedimientos de extensión y relleno de datos. Observando los resultados obtenidos se puede concluir que las series extendidas son muy aceptables.

3. TRABAJO DE CAMPO

Durante el período de desarrollo de este estudio (1990-1991, para un total de 13 meses de trabajo) se realizaron ciertas actividades de campo con el objetivo de recopilar información que sería requerida por los modelos hidrológicos. Este trabajo incluyó las siguientes actividades:

- Instalación de medidores automáticos de nivel en los ríos o quebradas aportantes a los SIPA (3 en cada uno). Con estos niveles y posteriores medidas de caudal en esos ríos y quebradas se puede obtener información que permite desarrollar curvas de calibración para definir de manera continua los caudales de los ríos a partir de medidas continuas de niveles.
- Instalación de dos estaciones climáticas completas (una en cada SIPA) y algunas de precipitación que complementen la información disponible. Antes del estudio solo había disponible una estación climatológica completa y con las dos estaciones instaladas se logra un mejor cubrimiento de la región. La información recopilada en estas nuevas estaciones permitirá calibrar los modelos en el período de estudio, y la continuidad futura de estas mediciones permitirá recalibrar los modelos en el futuro.
- Instalación de medidores de nivel antes y después de

cada estructura de toma en cada SIPA con el objeto de desarrollar curvas de calibración de cada una de esas estructuras. Con esas curvas de calibración y mediciones diarias de nivel antes y después de cada estructura, será posible conocer los caudales diarios de salida en cada una de ellas.

- Se realizaron levantamientos batimétricos y topográficos en ambos SIPA con el objeto de elaborar las curvas de área-elevación-capacidad. Se determinó el volumen de vegetación en ambos SIPA con el fin de incluirlo en los balances de agua. Se piensa que el volumen de vegetación en ambos SIPA representa un parte importante del balance de masas en los SIPA dada el área que ocupa la vegetación en la superficie del embalse (98% del área). No se quería incluir el volumen de vegetación como un parámetro más a ser determinado en los modelos, sino más bien estimarlo previamente.
- Mediciones de caudal a la salida de las estructuras de toma y en los ríos y quebradas aportantes a ambos SIPA. Se realizaron varias campañas de medición de caudal con el fin de tener mediciones de los mismos que cubrieran un amplio rango de valores y tener curvas de calibración representativas.
- Se desarrollaron curvas de calibración de todas las estructuras de toma que estaban en uso en ambos SIPA.

4. EVALUACION DEL POTENCIAL

La estructura general del procedimiento usado para evaluar el potencial de los SIPA para suplir una demanda se presenta en la Figura 2. Este procedimiento usa un esquema de un modelo estocástico que genera información de lluvia y clima que es utilizado por un modelo lluvia-escurrentía y otro de demanda para que su combinación conduzca al potencial (confiabilidad) asociado a esa demanda. La evaluación se hizo a nivel mensual para utilizar modelos estocásticos de generación confiables y de amplia experiencia práctica.

En el modelamiento estocástico se propusieron varios modelos estocásticos multivariados, a saber, multivariado autorregresivo de orden uno con parámetros constantes (MARC(1)), el mismo modelo pero con parámetros periódicos (MARP(1)), y modelos de desagregación. Estos modelos fueron sometidos a procesos de estimación y pruebas que incluyeron (Salas y otros, 1980):

- Pruebas de normalidad de los residuos
- Pruebas de independencia de los residuos
- Preservación de las características estadísticas históricas

Luego del procedimiento anterior se selecciono el modelo multivariado autorregresivo de orden uno con parámetros periódicos mensuales (MARP (1)). El modelo multivariado incluyó 15 series (10 de precipitación y 5 de clima) para el SIPA East Demerara y 11 series (6 de precipitación y 5 de clima), para el SIPA Boerasirie.

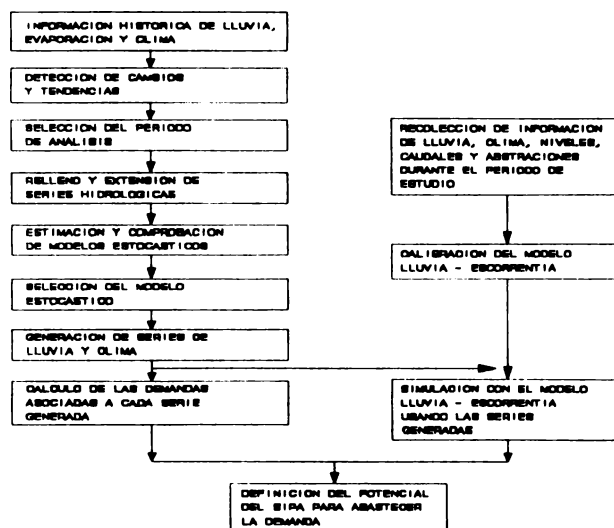


FIGURA 2. Procedimiento general para evaluar el potencial de cada SIPA a nivel mensual.

El modelo de lluvia-escorrentía utilizado representa una adaptación de un modelo desarrollado para el pantano natural Nanni en Surinam (De Beer y Bachuss, 1991). Este modelo está basado en un balance de aguas en los SIPA que tiene en cuenta los siguientes factores hidrológicos: precipitación y evaporación en el embalse, contenido de humedad del suelo, escorrentía directa de la cuenca aportante al embalse, vertimientos y extracciones del embalse. El modelo tiene seis parámetros que fueron determinados por medio de calibración para cada uno de los SIPA. La información usada para realizar la calibración corresponde a los 10 meses de información recopilada durante esta investigación. A pesar de usar sólo 10 meses de datos, se puede considerar que el proceso de calibración arroja resultados bastante aceptables. La Figura 3 presenta la comparación entre las abstracciones observadas y las simuladas por el modelo con los parámetros escogidos.

El modelo de demandas de agua tiene tres componentes:

- Abastecimiento de agua para la ciudad de Georgetown (Solo en el caso del SIPA East Demerara).

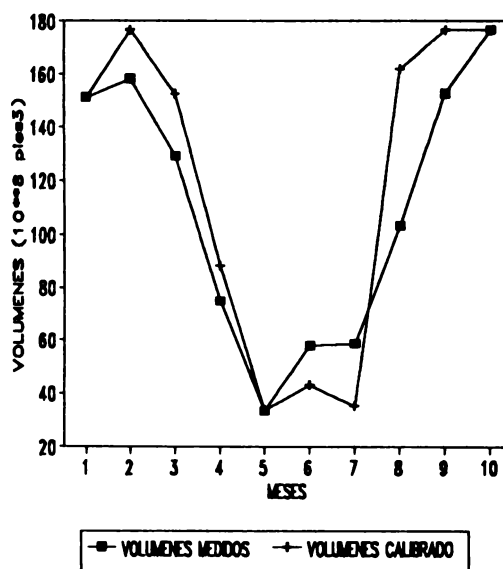


Figura 3a. Resultado calibración modelo lluvia - escorrentía a nivel mensual para el SIPA Boerasirie.

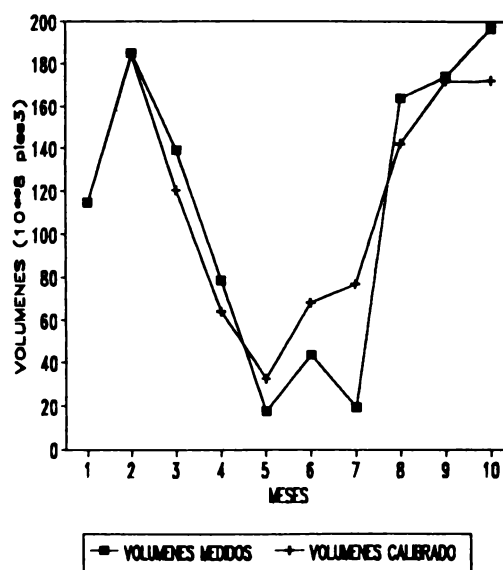


FIGURA 3b. Resultados calibración modelo lluvia - escorrentía a nivel mensual, SIPA East Demerara.

- Niveles de navegación en los cultivos de azúcar. La recolección de la caña de azúcar se hace en barcasas que navegan en los canales de irrigación y llevan la caña a centros de procesamiento. En estos centros las barcasas son descargadas por unas grúas para cuyo

manejo eficiente se necesita garantizar cierto nivel en las barcasas, lo cual se hace exigiendo niveles mínimos de navegación en los canales de irrigación.

- **Abastecimiento de agua para irrigación.**

En la investigación se asumió que la cantidad de agua requerida para la ciudad de Georgetown es una cantidad fija e igual a 11 millones de galones por día (Babbie y otros, 1989).

Para el cálculo de la demanda de agua para irrigación (D) se usó la expresión:

$$D = A [(UC - PEF) / EFF]$$

en donde UC es el uso consuntivo en lámina de agua, PEF la precipitación efectiva para el cultivo, EFF la eficiencia total del riego y A es el área total del cultivo. El uso consuntivo puede ser calculado como:

$$UC = K_0 * EP$$

en donde EP es la evapotranspiración de referencia y K_0 es el coeficiente del cultivo. El coeficiente K_0 debe ser definido de acuerdo con el patrón del cultivo durante la estación de producción y las características de crecimiento del cultivo (Shaw, 1988). Para calcular EP se usó el método de Penman utilizando la información climática de la estación ubicada en el Jardín Botánico de Georgetown. Este método requiere información sobre radiación solar, humedad y velocidad del viento (Shaw, 1988).

En el modelo de demandas de agua para irrigación se definió la precipitación efectiva para los cultivos como fue indicado por NEDECO (1988), compañía que realizó un estudio de disponibilidades de agua en Guyana y recomendó que si la precipitación mensual era menor de 75 mm, entonces la precipitación efectiva para el cultivo es el 75% de esa precipitación. Si la precipitación mensual es mayor de 75 mm, la precipitación efectiva para el cultivo es el 50% de esa precipitación. De todas maneras en las diferentes opciones de demanda consideradas en este estudio se contemplaron otros procedimientos para el cálculo de la precipitación efectiva para los cultivos.

Para cada finca abastecida por los SIPA se identificaron las estaciones de precipitación más cercanas y la precipitación promedio sobre la finca fue calculada considerando la distancia de cada estación a la finca. Para cada finca o grupo de fincas de cada SIPA se

definieron sus requerimientos de agua de riego y por agregación de las fincas o grupos de fincas servidas por los SIPA se definió la demanda de riego de cada SIPA.

Durante algunos meses del año, se requiere cierto nivel en los canales de riego para la navegación de tal manera que se pueda transportar y manejar la cosecha de la caña de azúcar. Para tener en cuenta estos niveles se estimó la eficiencia total en las fincas azucareras agregando el agua usada por los canales de irrigación para navegación. Bajo esta consideración se obtuvieron valores promedios de eficiencia del 15% en el riego de la caña de azúcar.

Para cada finca o grupos de fincas se identificaron los cultivos y las áreas de cada cultivo. Se consideraron cuatro tipos de cultivos: arroz, caña de azúcar, vegetales y frutales (con predominio de cultivos de palma de coco).

En el modelo de demandas de agua se consideraron nueve opciones diferentes, para cada una de las cuales se realizó el análisis de confiabilidad:

- Eficiencias totales de riego de 30% para frutales y vegetales, del 25% para arroz y 15% para caña de azúcar. Una capacidad de almacenamiento del suelo de 200 mm.
- Igual a la opción 1 pero usando una eficiencia del 40% para frutales y vegetales.
- Igual a la opción 1 pero usando una capacidad de almacenamiento del suelo de 175 mm.
- Áreas de los cultivos aumentadas en un 10%.
- Áreas de los cultivos aumentadas en un 20%.
- Las eficiencias totales de riego se aumentaron en 5% para todos los cultivos.
- Cálculo de la precipitación efectiva de los cultivos usando la fórmula sugerida por la Elsevier (1989).
- Combinación de las condiciones más favorables: capacidad de almacenamiento del suelo de 200 mm; eficiencias de vegetales y frutales del 40%; eficiencia de otros cultivos aumentada en 5%.
- Combinación de las condiciones menos favorables: capacidad de almacenamiento del suelo de 175 mm; áreas de cultivos aumentadas en 10%; eficiencias de

la opción 1.

Las series generadas de precipitación y clima que se obtuvieron usando el modelo estocástico sirven de información de entrada para el modelo de lluvia-escurrimiento (modelo de balance de aguas), debidamente calibrado, y para el modelo de demandas. Estos dos modelos producen la disponibilidad y el requerimiento en cada mes en cada SIPA. Usando la regla normal de operación como criterio de decisión se puede evaluar el potencial de cada SIPA para satisfacer las diferentes opciones de demanda en términos de la confiabilidad (Smith y Amisial, 1987). Para esta evaluación y para cada opción de demanda se usaron 50 series de 30 años de longitud y de valores mensuales. A los 50 valores de confiabilidad resultante para cada caso se les hizo un ajuste de distribución de probabilidades. La distribución seleccionada fue la distribución Normal, la cual paso con extrema facilidad las pruebas de ajuste que se realizaron (Smirnov-Kolmogorov, Chi-cuadrado y Cramer-Von Misses). Una vez ajustada la distribución se pueden calcular diferentes características de la confiabilidad incluyendo la media, límites de confianza, y valores asociados a ciertas probabilidades de no excedencia. Estos valores se calcularon para el año completo y considerando que el riego puede repartirse de dos maneras en dos periodos del año, una de Enero a Abril y de Agosto a Octubre y la otra de Febrero a Abril y de Agosto a Octubre. Estos periodos fueron definidos asumiendo que sólo en los meses de verano se necesita riego.

La confiabilidad se definió como la probabilidad de un funcionamiento exitoso del sistema durante el periodo de operación, es decir:

$$CONF = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N Z_t$$

en donde CONF representa la confiabilidad, N el número de periodos de tiempo y Z_t es una serie definida como:

$$Z_t = 1 \quad \text{si } DEF_t = 0 \\ Z_t = 0 \quad \text{si } DEF_t > 0$$

en donde DEF_t representa el déficit (imposibilidad de suplir la demanda) durante el periodo de tiempo t.

En la Tabla 2 se presentan los resultados de los análisis de confiabilidad para ambos SIPA y para los casos de opciones de demanda más probable (demanda media actual en la región), más favorable (demandas más bajas) y menos favorable (demandas más altas). Se analiza a continuación los resultados de cada SIPA.

En el caso del SIPA Boerasirie la posibilidad de rehabilitar nuevas tierras para riego se puede considerar como inexistente en términos de la confiabilidad. Para mejorar la confiabilidad en este SIPA se hace necesario aplicar una serie de medidas que deben ser estudiadas en más detalle para definir su combinación óptima. Estas medidas incluyen:

- Reducción o eliminación del volumen de vegetación, lo cual no solo aumenta el volumen disponible para almacenar agua sino que también reduciría drásticamente la evapotranspiración en el SIPA. Esta sola medida puede llevar a una mejora de la confiabilidad del orden del 40%, y la localizaría en un rango de valores aceptable (mayor al 70%).
- Mejorar las eficiencias del riego.
- Cambiar los patrones de cultivo, en especial colocando un límite al área de cultivo de arroz (mayor consumidor).
- Disminuir el área de los cultivos.
- Implantar un programa de mantenimiento del SIPA
- Definir un cuerpo o instituto para el manejo del SIPA con autoridad suficiente para decidir cuánta cantidad de agua y a quién se debe entregar. Este instituto debe contar con un presupuesto adecuado para realizar algunas de las sugerencias anteriores.

Otras posibilidades de mejorar la confiabilidad, tales como el re-uso del agua y el bombeo de agua de ríos cercanos, fueron descartadas debido a la necesidad de consumo de energía, la cual es un recurso muy escaso y costoso en Guyana. El país tiene una capacidad instalada efectiva de 35 Mw, todos generados por plantas termoeléctricas cuyo combustible debe ser importado.

En el caso del SIPA East Demerara la confiabilidad obtenida es también baja para todas las opciones de demanda. A pesar de estos valores relativamente bajos la situación es mucho mejor que en Boerasirie y la implantación de un sola de las medidas sugeridas para el SIPA Boerasirie pondría la confiabilidad del SIPA East Demerara en términos mas que aceptables (70%).

5. ANALISIS DE LA OPERACION

La estructura general del procedimiento usado para el análisis de la operación en los SIPA se presenta en la Figura 4. Este procedimiento usa información histórica

Tabla 2. Resultados Análisis de Confiabilidad

SIPA	OPCIÓN	Media	Valor Mínimo	Valor máximo	Desviación típica	0.95 límite superior	0.95 límite inferior
Boerasirie	Mas probable	0.459	0.403	0.503	0.02676	0.4665	0.4516
	Mas favorable	0.487	0.431	0.550	0.02842	0.4953	0.4795
	Menos favorable	0.448	0.389	0.500	0.02573	0.4552	0.4409
Demerara	Mas probable	0.589	0.472	0.728	0.06413	0.6067	0.5711
	Mas favorable	0.587	0.486	0.683	0.03850	0.5981	0.5767
	Menos favorable	0.507	0.403	0.572	0.03213	0.5157	0.4979

diaria de precipitación y clima como datos de entrada a un modelo de lluvia-escorrentía y a otro de demanda, los cuales generan información que es usada por un modelo de operación que permite analizar y hacer recomendaciones sobre la operación de los SIPA

Las series históricas de precipitación y clima se obtuvieron después del análisis hidrológico que permitió su verificación y el relleno y extensión de datos. En este caso se usaron las mismas series de precipitación (10 para SIPA East Demerara y 6 para SIPA Boerasirie) y clima (5 para ambos SIPA) que se usaron a nivel mensual.

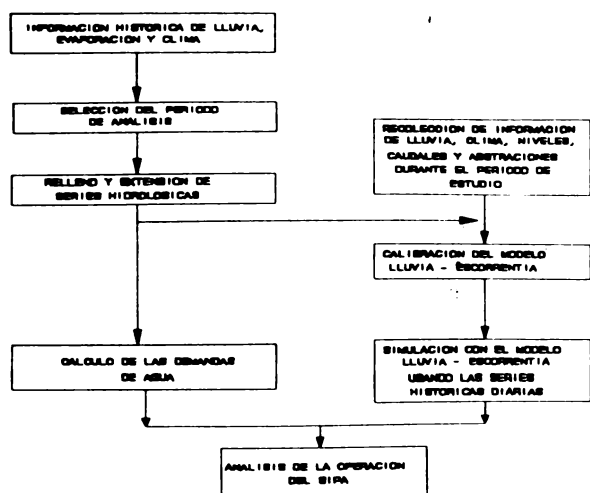


FIGURA 4. Procedimiento general para el análisis de la operación de cada SIPA. Nivel diario.

El modelo de lluvia-escorrentía usado a nivel diario fue el modelo SSARR del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (1957). Para la calibración de este modelo, se asumió que la escorrentía directa hacia el embalse de la cuenca aportante se encontraba concentrada en un punto,

aunque en realidad es toda una banda. En este procedimiento se usó la información hidrológica recolectada a nivel diario en el período Noviembre de 1990 a Septiembre de 1991. La representación de la cuenca para el modelo SSARR en ambos SIPA es la que se muestra en la Figura 5. Los parámetros de este modelo están constituidos por las tablas mostradas en esa figura, los parámetros de tránsito (número de fases y tiempo de almacenamiento), las condiciones iniciales de los índices, los pesos de las estaciones de precipitación y evaporación, y los valores límites de los índices. La calibración obtenida para ambos SIPA se puede considerar bastante aceptable para el nivel diario, con el modelo siguiendo bastante bien los picos y valles de la serie observada. En la Figura 6 se muestra algunos de los resultados de la calibración del modelo SSARR para el SIPA East Demerara.

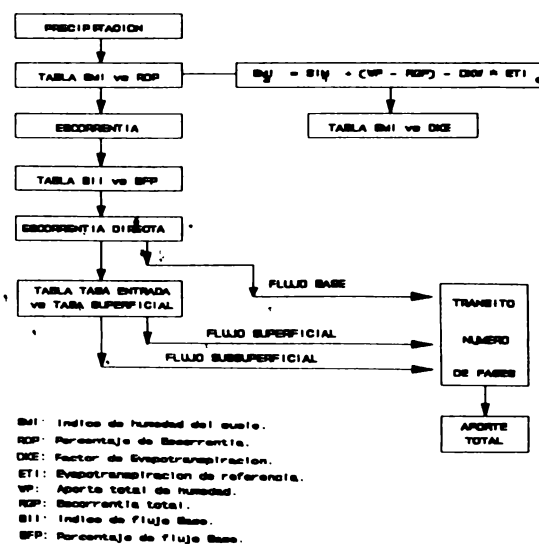


FIGURA 5. Representación de la cuenca aportante de los SIPA para el modelo SSARR.

Básicamente el modelo de demanda a nivel diario es el mismo descrito a nivel mensual, con algunos ajustes para acomodarlo a nivel diario. En este caso se consideraron tres opciones diferentes para las demandas de agua:

- Eficiencias totales de riego de 30% para vegetales y frutales, 25% para arroz : 15% para caña de azúcar. Una capacidad de almacenamiento del suelo de 200 mm.
- Cálculo de la precipitación efectiva de los cultivos usando la fórmula sugerida por Elsevier (1989).
- Combinación de las condiciones más favorables: capacidad de almacenamiento del suelo de 200 mm; eficiencia de vegetales y frutales de 40%; y eficiencia de otros cultivos incrementada en 5%.

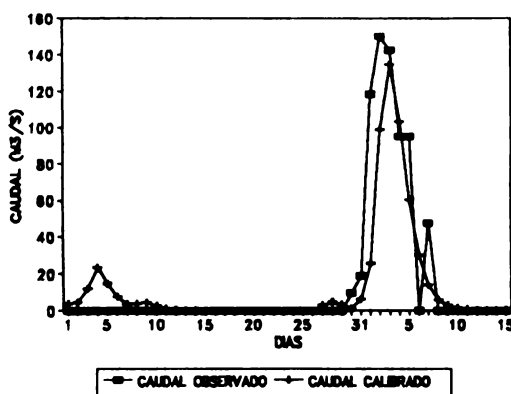


FIGURA 6. Calibración del modelo SSARR para el SIPA East Demerara para el período del 1 de Marzo al 15 de Abril, 1991.

Para el análisis hidrológico de la operación de ambos SIPA se usó la variante 1 de la regla normal de operación con 2 y 3 niveles de entrega (Smith y Amisial, 1987). Debido a la crítica situación de disponibilidad de agua, se trata de investigar cómo mejoraría la operación de los sistemas si se introdujesen niveles de racionamiento en ambos SIPA.

Para evaluar los resultados de la operación se usaron índices de confiabilidad, recuperabilidad y vulnerabilidad (Hashimoto y otros, 1982) que se definen más adelante. Como índices de vulnerabilidad se usaron la suma de los máximos déficit en período de falla (directo y al cuadrado), la suma de los déficit (directos y al cuadrado) y el máximo déficit. Se trataba de mirar aquellas condiciones de la regla de operación que maximizando la confiabilidad y la recuperabilidad, minimizarán al mismo tiempo la vulnerabilidad. Los resultados obtenidos son

similares para ambos SIPA y se muestran a manera de ejemplo en las Tablas 3 y 4 para la opción de la demanda 1. En esas tablas el conjunto de parámetros 1 representa la regla normal de operación y los otros conjuntos representan la variante 1 de esa regla con niveles inferiores de entrega que corresponden a racionamientos cada vez mas estrictos.

La variante 1 de la regla normal de operación para el caso de dos niveles de entrega se puede escribir como:

$$\begin{aligned}
 E_t &= \text{DISP}_t & \text{si } \text{DISP}_t &\leq \text{NE1} \\
 E_t &= \text{NE1} & \text{si } \text{NE1} &\leq \text{DISP}_t \leq \text{NA1} + \text{NE1} \\
 E_t &= \text{DISP}_t - \text{NA1} & \text{si } \text{NA1} + \text{NE1} &\leq \text{DISP}_t \leq \text{NA1} + \text{NE2} \\
 E_t &= \text{NE2} & \text{si } \text{NA1} + \text{NE2} &\leq \text{DISP}_t \leq \text{NA2} + \text{NE2} \\
 E_t &= \text{NE2} + \text{VERTIMIENTO} & \text{si } \text{NA2} + \text{NE2} &\leq \text{DISP}_t
 \end{aligned}$$

en donde E_t es la entrega en el período de tiempo t , DISP_t es la cantidad de agua disponible en el SIPA para ser entregada durante el período de tiempo t , NE1 y NE2 son los dos niveles de entrega y NA1 y NA2 son los dos volúmenes de almacenamiento que definen los anteriores niveles de entrega. Los niveles de entrega se definen como fracciones de la demanda durante el período de tiempo (DEM_t):

$$\text{NE}_i = f_i \times \text{DEM}_t$$

y los volúmenes de almacenamiento como fracciones del almacenamiento total permitido (ALMT):

$$\text{NA}_i = g_i \times \text{ALMT}$$

en donde f_i y g_i son factores fraccionarios en el rango (0,1) que definen por completo la regla de operación. En la Tabla 5 se presentan los parámetros utilizados en la variante 1 de la regla normal de operación para obtener los resultados mostrados en las Tablas 3 y 4 mencionadas anteriormente.

En el análisis de la operación, la confiabilidad se definió de igual manera que para el análisis del potencial. La recuperabilidad se definió como:

$$\text{RECUP} = P/(1 - \text{CONF})$$

en donde RECUP representa la recuperabilidad y P está definido como:

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N W_t$$

Tabla 3. Resultados de la operación para el SIPA Boerasirie usando la opción de demanda 1.

Característica	P1 ¹	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Confiabilidad	.575	.325	.382	.405	.419	.412	.426
Recuperabilidad	.101	.045	.042	.041	.039	.042	.042
Σ Máxima Falla ²	12.55	4.52	4.43	4.29	4.28	4.73	4.68
Σ Máxima Falla al cuadrado ³	30.6	12.0	12.1	12.1	12.2	12.2	12.3
Σ Déficit al cuadrado ⁴	2.82	2.83	2.86	2.89	2.91	2.78	2.81

1. Corresponden a cada conjunto de parámetros de la regla de operación descritos en la tabla 5
2. Valores mostrados por 10^3
3. Valores mostrados por 10^4
4. Valores mostrados por 10^6

Tabla 4. Resultados de la operación para el SIPA East Demerara usando la opción de demanda 1.

Característica	P1 ¹	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Confiabilidad	.769	.524	.608	.642	.662	.592	.625
Recuperabilidad	.074	.017	.024	.024	.024	.025	.027
Σ Máxima Falla ²	1.20	.489	.572	.555	.537	.641	.636
Σ Máxima Falla al cuadrado ³	8.73	3.41	4.06	4.33	4.36	4.36	4.39
Σ Déficit al cuadrado ⁴	9.21	8.35	8.57	8.78	8.99	9.97	9.55

1. Corresponden a cada conjunto de parámetros de la regla de operación descritos en la tabla 5
2. Valores mostrados por 10^3
3. Valores mostrados por 10^3
4. Valores mostrados por 10^4

Tabla 5. Parámetros de la Variante 1 de la Regla Normal de Operación utilizada en ambos SIPA

Parámetros	P1 ¹	P2	P3	P4	P5	P6	P7
f_1	1.0	0.5	0.5	0.7	0.85	0.1	0.1
f_2	-	1.0	1.0	1.0	1.0	0.3	0.3
f_3	-	-	-	-	-	1.0	1.0
g_1	1.0	0.5	0.3	0.2	0.15	0.2	0.1
g_2	-	1.0	1.0	1.0	1.0	0.4	0.3
g_3	-	-	-	-	-	1.0	1.0

1. Los P1, ..., P7 representan los distintos conjuntos de parámetros considerados para las reglas de operación

W_t es una serie definida como:

$$W_t = 1 \quad \text{si} \quad DEF_t = 0 \quad \text{y} \quad DEF_{t+1} > 0$$

$$W_t = 0 \quad \text{en cualquier otra situación.}$$

La vulnerabilidad intenta medir la severidad de las consecuencias de las fallas (déficit) del sistema. En términos generales puede escribirse como:

$$V = \sum_{j \in I} S_j E_j$$

en donde I representa el conjunto que incluye a cada estado insatisfactorio (períodos consecutivos de déficit), S_j es un indicador de la severidad de la falla y E_j es la probabilidad de que S_j sea la más insatisfactoria de las fallas que ocurren durante la permanencia en el estado insatisfactorio j .

En las Figuras 7 y 8 se muestra las curvas de intercambio entre la confiabilidad y la recuperabilidad, y entre la confiabilidad y la vulnerabilidad para ambos SIPA. Los resultados más importantes son los que muestran el drástico cambio de la vulnerabilidad cuando se trata de obtener valores muy altos de la confiabilidad aunque mejora la recuperabilidad. Las recomendaciones finales para la operación representan un compromiso entre confiabilidad y vulnerabilidad.

Es importante resaltar que los resultados del análisis de la operación a nivel diario son consistentes con los obtenidos a nivel mensual en la evaluación del potencial de ambos SIPA, con confiabilidad algo mayores a nivel diario como era de esperarse. Nuevamente los resultados muestran que el SIPA Boerasirie se encuentra en una situación mucho más crítica que el SIPA East Demerara.

Como se esperaba, los mejores resultados de confiabilidad y recuperabilidad se obtuvieron con la regla normal de operación, sin embargo, desde el punto de vista de la vulnerabilidad los resultados de esta regla son bastante pobres si se observa el parámetro de sumatoria de máxima falla en período de déficit o de la máxima falla al cuadrado en período de déficit. Se puede observar que una solución de compromiso entre confiabilidad y vulnerabilidad recomendaría una regla de operación que sugiere el uso de niveles de racionamiento cuando los SIPA se encuentran en una situación bastante crítica (almacenamientos inferiores al 20% de la capacidad).

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos se pueden escribir las

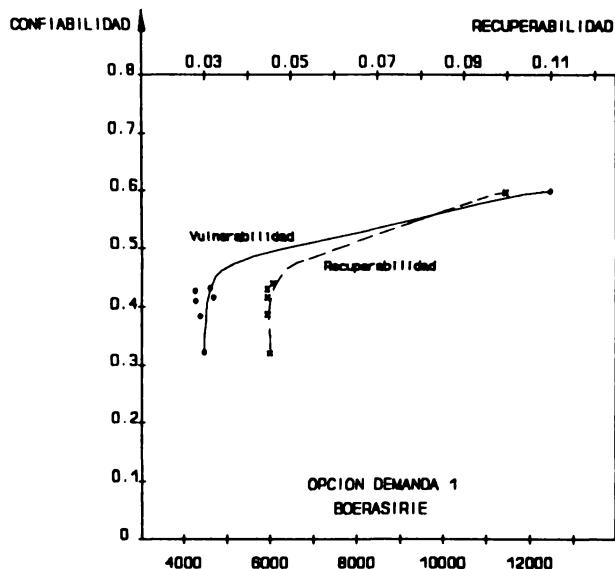


Figura 7. Curvas de Intercambio Confiabilidad-Vulnerabilidad SIPA Boerasirie.

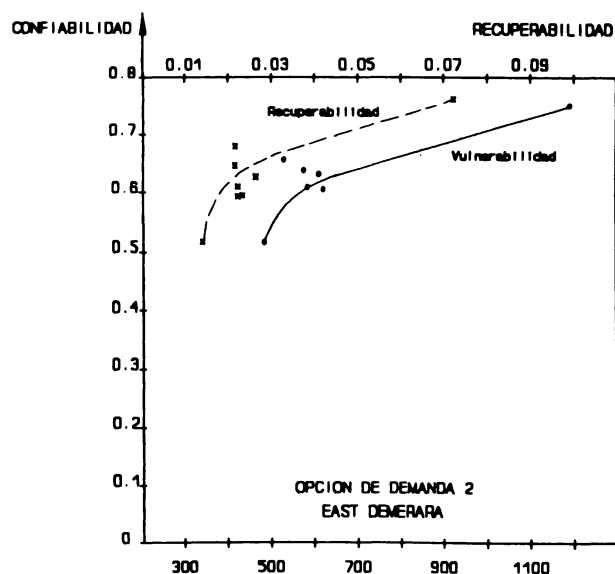


Figura 8. Curvas de Intercambio Confiabilidad-Vulnerabilidad SIPA East Demerara

siguientes conclusiones y recomendaciones:

- Los resultados obtenidos son preliminares. El modelo de lluvia-escurrentía fue calibrado usando sólo 10 meses de información. Los resultados deben entonces revisarse cuando se disponga de información adicional.

- La información hidrometeorológica utilizada en la investigación resultó ser de muy buena calidad, con algunas estaciones con más de 100 años de información diaria.
- El modelo de lluvia-escorrentía de balance de aguas usado en el estudio a nivel mensual dio resultados bastante aceptables.
- Los resultados obtenidos en el análisis de la operación mostraron una gran consistencia con los obtenidos en la evaluación del potencial. Habiéndose utilizado procedimientos generales y de modelamiento completamente distintos, esto da una gran confianza en los resultados obtenidos.
- Se muestra la gran importancia que tiene el usar índices adicionales (vulnerabilidad) al solo uso de la confiabilidad en la evaluación de los resultados de la operación. La búsqueda de una solución de compromiso entre estos dos índices sugiere cosas muy distintas a las que se obtendrían con el solo uso del índice de confiabilidad.
- A pesar de que el modelo lluvia-escorrentía SSARR se desarrolló originalmente para sistemas hidrológicos muy complejos, los resultados obtenidos en las pequeñas cuencas aportantes a ambos SIPA fueron muy aceptables.
- Desde el punto de vista de operación de ambos SIPA, y en las condiciones actuales, sería muy conveniente considerar niveles de racionamiento cuando los niveles de almacenamiento estén muy bajos (inferiores al 20% de la capacidad total).
- Una de las mayores preocupaciones es la reducción acelerada de la capacidad de ambos SIPA que en los últimos 40 años se puede estimar del orden del 50%. Si no se toman las medidas necesarias para enfrentar este problema, en unos pocos años ambos SIPA se convertirán en sabanas de siembra o pastoreo de ganado. Ambos SIPA no tienen actualmente ninguna posibilidad de regar tierras adicionales. Sólo mediante la implantación de una serie de medidas se podrá tener alguna esperanza de poner más tierras bajo riego. La situación en el SIPA Boerasirie es mucho más crítica que en el SIPA East Demerara.
- Se hace necesaria la intervención inmediata para recuperar ambos SIPA de su deterioro acelerado y de la pérdida de su capacidad. El gobierno de Guyana debe aplicar los mecanismos para restituir ambos SIPA a

capacidades de almacenamiento aceptables, pues ellos son las fuentes de irrigación de los campos de cultivo que constituyen en gran medida el sustento del país.

REFERENCIAS

- Babtie, Shaw y Morton Consulting Engineers, Institutional Strengthening of the Water Supply and Sanitation Sector, Guyana Water Authority, Georgetown, Guyana. 1989.
- Beer de, J. y L. Bacchus, A waterbalance Model of two conservancies in Guyana. Aceptado para publicación en *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* ASCE, Estados Unidos, 1991.
- Doorenbos J. y W.O. Pruitt, *Guidelines for Predicting Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, Roma. 1977.
- Elsevier, *Agricultural Compendium*, The Netherlands 1989.
- Hashimoto T., R. Stedinger y D.P. Loucks, Reliability, Resiliency and Vulnerability Criteria for Water Resources System Performance Evaluation. *Water Resources Research*, Vol 18 (1), 1982.
- Hydrometeorological Department, Ministry of Works and Communication, Rainfall, Evaporation and Climatic Data. Georgetown, Guyana. 1990.
- ILRI, Discharge Measurements Structures. Wageningen, The Netherlands. 1878.
- NEDECO, Manual of Operation, Maintenance and Supervision of Drainage and Irrigation Systems. 1989.
- Salas J. D., J.W. Delleur, V. Yevjevich y W.L. Lane, *Applied Modelling of Hydrologic Time Series*. Water Resources Publications. Littleton, Colorado, Estados Unidos. 1980.
- Shaw, E. M., *Hydrology in Practice*. Van Nostrand Reinhold, Londres, U. K. 1988.
- Smith R. A. y R. A. Amisial, *Estimación del Potencial Hidroeléctrico*. CIDIAT y OEA, Mérida, Venezuela. 1987.

