

EL MODELO HIDROGEOLOGICO DE LOS ACUIFEROS COSTEROS DEL PERU

Por: YAAKOV GILBOA

RESUMEN

Los acuíferos costeros del Perú, que cubren menos del 5% de la superficie de su costa árida, se limitan a los 52 valles de los ríos y las pampas limitantes. Excluyendo la parte noroccidental de la costa donde existen también acuíferos confinados del Terciario, todos los acuíferos son aluviales, que con espesor de 20-200 m., sobreyacen el relleno sedimentario del Terciario.

Alrededor de 5,000 pozos extraen anualmente 1,600 millones de metros cúbicos (MMC) de agua, aproximadamente.

Los acuíferos se encuentran por debajo del límite inferior de la parte activa de las cuencas colectoras occidentales de la Cordillera Andina. Los acuíferos aluviales se alimentan por la infiltración de las aguas de los ríos, percolación en canales de irrigación y recirculación de aguas de regadío.

La salinidad en las aguas subterráneas se atribuye a varios factores, como: lixiviación de minerales por el flujo subterráneo, evaporación desde el nivel piezométrico somero, insuficiente drenaje, etc.

Se exponen varios aspectos de la optimización de los recursos hídricos por medio de derivaciones y bombeo.

1.— INTRODUCCION

La estrecha y desértica franja costera del Perú, cuya longitud es de 2,200 Km., está limitada al oeste por el Océano Pacífico y al este por la elevada barrera de la Cordillera de los Andes. El 60^o/o de la longitud de la Cordillera, aproximadamente, está constituido por el batolito Andino y el 40^o/o restante por formaciones volcánicas y sedimentarias. La anchura de la costa peruana varía entre 50 y 100 Km. y su superficie cubre 136,000 Km², aproximadamente (Mapa 1).

A lo largo de la costa, que es una típica zona fallada de borde, se encuentran tres unidades morfológicas importantes: los flancos elevados de los Andes, los llanos, los valles y la Cordillera de la Costa. Esta última, poca elevada, de edad precámbrica—paleozoica se desarrolla principalmente entre Paracas y río Sama (Dpto. de Tacna) y algunos de sus remanentes están dispersados en la costa norteña, al oeste del Desierto de Sechura (Illescas, Paita).

La llanura costera está constituida por extensas pampas elevadas, valles de ríos y colinas. Los recientes movimientos tectónicos quedan reflejados por la profunda erosión y por las terrazas fluviales y marinas. Las extensas áreas de la costa están cubiertas por arenas eólicas, mientras que en el sur, desde Arequipa hasta Tacna, las elevadas pampas están invadidas por cenizas volcánicas de origen eólico. La costa tiene poca elevación en su parte septentorial, mientras que en el sur su elevación varía entre 500 y 1,500 m.

Desde Tumbes en el norte hasta Tacna en el sur, dominan condiciones desérticas extremas, la costa está cortada por 52 valles de río (Mapa 1). Estos valles junto con las pampas adyacentes contienen los únicos acuíferos costeros.

La falta de lluvias en la costa peruana es debida a dos factores: 1) la barrera elevada de los Andes que impide el paso de las nubes que cruzan el continente desde el Océano Atlántico, 2) las corrientes frías de Humboldt en el Océano Pacífico que impide la condensación de nubes de lluvia en una altura suficiente. Los vientos fríos durante los meses del invierno, Mayo a Noviembre, forman una neblina (Garúa) a altitudes poco elevadas, 100 a 750 m., dando lugar a una humedad relativa elevada en algunas regiones costeras.

En total, la precipitación media anual en la costa varía entre 4 y 40 mm., excluyendo el departamento más septentorial de Tumbes, donde el encuentro de corrientes frías y calientes en el océano da lugar a una precipitación más elevada, 70—130 mm/año. La orografía es el factor que controla la lluvia, variando su límite bajo entre 100 m. en el norte y más de 2,500 m. en el sur.

Las temperaturas medias varían entre 17^o y 25^oC, siendo la mínima de 13^oC y la

ACUIFEROS COSTEROS DEL PERU

máxima de 34°C. La evaporación se estima entre 400 y 2,000 mm. por año (Servicio de Agrometeorología e Hidrología -SAH- 1962 a 1966).

Los ríos costeros drenan las cuencas colectoras occidentales de los Andes. Su corriente torrencial es debida a las lluvias que caen en las partes altas de las cuencas, al oeste de la divisoria continental, y al deshielo producido en las cumbres de la Cordillera Andina.

Más de 32,000 millones de m³ de agua fluyen anualmente por los 52 ríos costeros, de los cuales solamente seis son pereniales. El caudal anual de los ríos varía entre 50 y 4,700 millones de m³ de agua (véase Tabla 1 y SAH, 1962-1966).

2.— LOS ACUIFEROS DE LA COSTA

a) Dimensiones

Los acuíferos aluviales cubren una superficie de 7,000 Km² o alrededor del 5% de la superficie total de la costa, y se encuentran por debajo de la parte activa de las cuencas colectoras.

Los acuíferos costeros forman por lo menos 52 unidades hidrológicas, separadas entre sí por elevadas pampas y/o por los flancos de los Andes. Su superficie varía entre 10 y 500 Km². El espesor de la mayoría de los acuíferos aluviales varía entre 20 y 200 m., formando una manta delgada que cubre una potente (400 a 700 m.) serie sedimentaria terciaria, que rellena las depresiones costeras. Rocas ígneas constituyen el substrato de estas depresiones.

b) Litología de los acuíferos

Los acuíferos costeros, entre Piura y Tacna, consisten en depósitos aluviales del Cuaternario. Estos depósitos, productos de erosión, están compuestos principalmente por clásticos no consolidados (gravas, guijarras, etc.). Las gravas están mezcladas con fracciones coluviales como arcilla, limo, marga y limolita (Gilboa, 1969). Acuíferos arenosos del Terciario son explotados (Piura) o explotables (Zarumilla-Tumbes) en el extremo norte de la costa.

Condiciones diferentes de sedimentación han causado la formación de acuíferos heterogéneos en los valles aluviales. Dominan los depósitos fluviales, pero sedimentos de piedemonte, delta, litoral y eólicos forman también parte de la capa superior en las depresiones.

TABLE 1: DATOS FLUVIOMETRICOS EN LOS RIOS DE
LA COSTA PERUANA

(Según SAH)

Río	Area total de cuenca (Km ²)	Período de medidas	Nº de años bajo medida	Escorrentía Superficial (Miles de m ³ /año)	Duración de Escor. máx.
Zarumilla	1,000			115.000	
Tumbes	9,459	1940-1960	13	3,927.066	Enero-Junio
Chira	10,017	1937-1960	21	3,659.305	Enero-Junio
Huancabamba	3,430	1946-1960	12	559.687	
Piura	10,038	1928-1960	24	1,038.852	Feb.-Mayo
La Leche	4,216	1921-1960	38	201.648	Feb.-Mayo
Chancay (Lambayeque)	5,385	1914-1960	47	896.508	Enero-Junio
Zaña	2,058	1918-1960	41	230.172	Feb.-Mayo
Jequetepeque	5,810	1921-1960	38	877.680	Enero-Mayo
Chicama	5,806	1911-1960	50	982.260	Enero-Mayo
Moche	2,621	1912-1960	47	297.480	Enero-Mayo
Virú	1,961	1938-1960	23	124.428	Enero-Mayo
Santa	12,332	1938-1960	23	4,659.648	Dic.-Mayo
Nepeña	1,832	1929-1960	21	70.152	Enero-Mayo
Casma	3,150	1931-1960	30	190.428	Enero-Abril
Huarmey	2,050	1930-1960	29	102.312	Enero-Abril
Pátivilca	4,440	1935-1960	24	1,455.108	Dic.-Mayo
Huaura	4,280	1925-1960	28	965.792	Enero-Abril
Chancay	2,900	1921-1960	35	456.624	Enero-Abril
Chillón	2,224	1919-1960	36	289.356	Enero-Abril
Rímac	3,389	1921-1960	31	947.100	Enero-Abril
Mala	2,182	1938-1960	22	536.664	Enero-Abril
Cañete	6,090	1926-1960	31	1,568.340	Enero-Abril
San Juan	4,000	1922-1960	36	467.736	Enero-Abril
Pisco	3,400	1938-1957	19	859.271	Enero-Abril
Ica	1,420	1948-1957	9	311.282	Enero-Abril
Río Grande		1938-1957	19	452.358	Enero-Abril
Yauca	4,747	1948-1957	7	275.959	
Ocoña		1948-1950	3	794.852	
Majes	10,237	1945-1957	12	2,783.851	
Tambo	8,932	1933-1957	19	1,126.330	
Moquegua		1948-1957	8	60.296	Enero-Marzo
Sama			1	52.271	
Caplina	1,320	1938-1957	18	38.694	Enero-Marzo

Variaciones en las condiciones climatológicas, los cursos de los ríos y en la velocidad de las escorrentías superficiales son los principales factores que controlan el tipo de la deposición fluvial. Por ejemplo, en el valle de Ica, aguas arriba de la ciudad del mismo nombre, el acuífero está compuesto por 100 a 150 m. de capas permeables, mientras que aguas abajo, y cerca del límite sur del valle, no pasan de los 25–50 m. Estos sedimentos no consolidados son compuestos por capas discontinuas, lentejones irregulares y cuñas, y su permeabilidad se reduce con la profundidad. La única excepción ocurre en la parte occidental de la Pampa de Ñoco (Chincha) donde capas continuas y casi horizontales de arena y gravas, con espesor de 0,5–3 m., alternan con capas de limo. En la parte oriental de la pampa, estos sedimentos aluvialitorales y bien estratificados pasan a ser depósitos gruesos de piedemonte.

Las diferentes terrazas en los valles de los ríos (generalmente 2 ó 3) indican variaciones de nivel debido a movimientos epeirogenéticos y eustáticos así como cambios en las condiciones de sedimentación. Por ejemplo, en la Pampa Cabeza de Toro (Pisco) la terraza más antigua está compuesta por gravas cementadas por sal, mientras que la segunda y la más baja, está libre de sales variando sus facies desde arcillas lacustres hasta conglomerados gruesos (Gilboa, 1969).

Las fracciones clásticas, productos de erosión de las sierras que limitan los acuíferos por el este, están compuestos por fragmentos de granodiorita, andesita, basalto, cuarcita etc., mientras que esquistos aparecen solamente al norte de Salas (Lambayeque). Por la dominante aridez, la erosión es exclusivamente de tipo mecánico, y fenómenos de kaolinización son muy raros. Dunas antiguas constituyen también la secuencia clástica de los acuíferos, pero en general las capas de arena pura son muy limitadas en su extensión (La Yapana, Nazca).

La edad de los acuíferos aluviales es del Cuaternario, excepto la parte baja del acuífero en la Pampa de Ñoco que puede ser relacionada al Terciario Superior—Cuaternario.

c) Bombeo en los acuíferos costeros del Perú

Alrededor de 5,000 pozos están distribuidos por los acuíferos aluviales. Su profundidad varía entre 20 y 120 m. y su caudal es de 30 a más de 300 m³/h.

Se puede realizar solamente una estimación aproximada de la extracción anual de los acuíferos en la costa del Perú, puesto que no existe un censo detallado de los pozos así como información fidedigna sobre el método de operación de los mismos.

Las cantidades extraídas se estiman a continuación:

Departamento	Cantidad extraída (MMC/año)
Tumbes–Piura (incluyendo 100 MMC/año de acuíferos terciarios)	250
Lambayeque	150 – 200
La Libertad	300
Ancash	70
Lima	300
Ica	500 – 550
Arequipa–Moquegua–Tacna	30
	1,600 – 1,700

La cantidad de agua extraída de los 7,000 Km² de acuíferos aluviales costeros del Perú, se evalúa en 1,600 MMC/año. Esta cifra equivale a un 4,5^o/o del caudal de los ríos costeros, o aproximadamente a un 18^o/o del agua superficial utilizada para riego en 1970.

3.— CARACTERISTICAS HIDROLOGICAS DE LOS ACUIFEROS

a) Tipo de acuíferos

La mayoría de los acuíferos aluviales son freáticos, principalmente en su parte superior. Capas impermeables y goteras intercaladas (3 hasta 11 capas arcillosas de 0,5 m. de espesor fueron detectados en el aluvión del valle de Ica) los transforman en confinados en su parte inferior. Ensayos de interferencia indican generalmente capas acuíferas semiconfinadas (coeficiente de almacenamiento de 0,2–5^o/o, Tabla 2).

Al sur de Piura, no se han encontrado acuíferos profundos confinados, por debajo de la secuencia terciaria. Más aún, en varios lugares (Nazca, Río Grande, Ica, Villacurí, Pisco, Chíncha, Virú, Santa Catalina, Chicama y otros) la ausencia de tales acuíferos fue probada por perforaciones y estudios geoeléctricos (TAHAL; 1964, 1966, 1968, 1969). Los únicos acuíferos profundos y confinados en la costa del Perú se encuentran al norte de Piura.

b) Características de los acuíferos

1) Parámetros hidrológicos

Los valores de transmisividad, permeabilidad y almacenamiento, presentados en Tabla 2, caracterizan los acuíferos aluviales de la Costa Peruana.

TABLA 2: PARAMETROS HIDROLOGICOS DE LOS ACUIFEROS ALUVIALES EN LA COSTA DEL PERU

Acuifero	Capac. Espec. de Pozos (m ³ /h/m)	Coef. de Transmisividad (m ² /día)	Coef. de Permeabilidad (m/día)	Coef. de Almacena- miento (o/o)
Olmos(*)			8-30	
La Leche: Salas(*)			15	
Motupe(*)			60	
Jayanca	2-26	40-965	2-44	
Chicama	2-40	50->1400		2-4
Santa Catalina	2-10	5-200		2-4
		200->2000		
Virú: Centro	25	50-300		2-4
Sur		1000-3000		
Chincha: Parte princ.	<25	100-500	5-15	4-8
Norte	25-80	1000-3000	50-100	
Sur	25-80	1000-3000	30-75	
Pisco: Valle	< 10	200	10	
Pampas de Ocas	10-20	200-1000	10	
Lanchas	8-30	300-1000	10-30	1,5
Villacurí: Este	20-50	2000-3000	40-80	
Norte-NE	20-50	2000-3000	40-80	
Oeste y Sur	4-15	200-500	5-45	
Ica: Norte	15-75	2000-5000	70-140	
Centro	5-45	1000-2000	30-80	0,5-5
Sur	5-20	500-1000	5-40	
Río Grande				
Santa Cruz	<10	200-400		
Palpa-Viscas	<10	100-300		
Ingenio	2-20	30-300	<10	
Nazca	5->20	10-300		
		2700-5400	>100	
Taruga-Pajonal	2->20	50-975	5-20	
Trancas-Chauchilla	2-20	10-300	0,5-10	
		600-1100		

(*) Italconsuit, 1966; Los demás de los datos - TAHAL: 1964-1969.

- 2) La relación entre la capacidad específica de los pozos y la transmisividad de los acuíferos.

La capacidad específica del pozo se define como el caudal del pozo correspondiente a 1 m. de descenso, y sus dimensiones son $m^3/h/m$. La capacidad específica en un pozo construido correctamente está correlacionada casi linealmente con la transmisividad del acuífero. El gráfico 1 indica los valores de la capacidad específica en ocho diferentes acuíferos versus la transmisividad de los mismos. Los valores están distribuidos entre dos líneas casi paralelas, demostrando la relación lineal entre la capacidad específica de los pozos y la transmisividad de los acuíferos aluviales heterogéneos de la Costa Peruana. Las desviaciones de estos límites se deben, posiblemente, al acabado inadecuado de algunos pozos.

c) Profundidad del nivel de agua

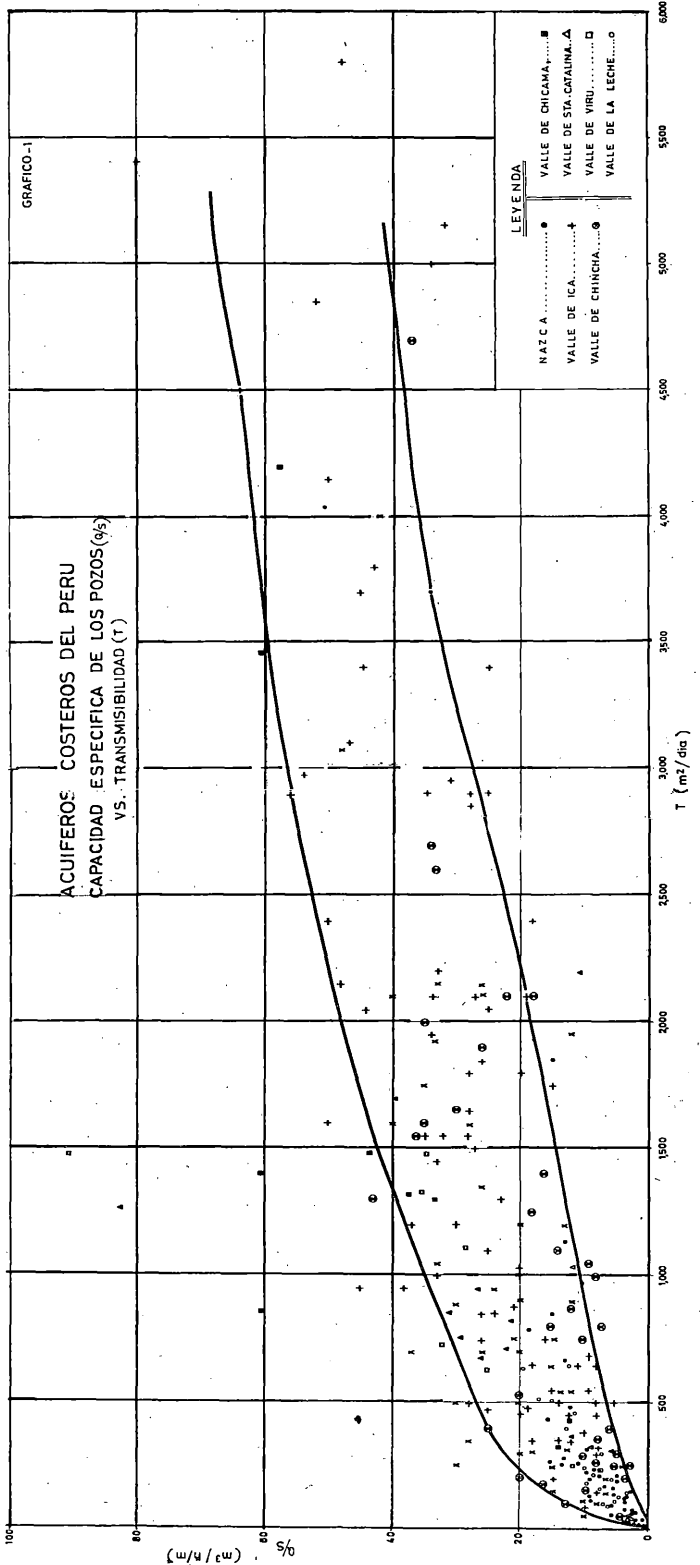
El nivel piezométrico en los acuíferos aluviales se encuentra generalmente entre los 5 y 40 m. por debajo de la superficie (Pérez; 1962, TAHAL; 1964, 1966, 1969). En los llanos cerca de la playa, en acuíferos someros con alimentación permanente (Lanchas, Ocas) o cerca de afloramiento de lecho rocoso que interfieren (Tajahuana en el valle de Ica o en la parte occidental de la Pampa de Villacurí), el nivel piezométrico está elevado (1 a 5 m. por debajo de la superficie). Niveles piezométricos profundos son escasos; Pampa de Ñoco – 80 m., Pampa de los Catillos – 60 m., Chauchilla (Nazca) – 50 m. y otros. No se encontró, hasta la fecha, ningún nivel piezométrico por debajo de los 100 m.

En los valles estrechos, con fuertes gradientes topográficos y con acuíferos relativamente someros, el nivel piezométrico es poco profundo y casi paralelo a la superficie (Moquegua, Nazca, Ingenio, Palpa, Río Grande y otros). En las zonas con nivel piezométrico somero se pierden, por evaporación, grandes cantidades de agua.

d) Gradiente hidráulico y dirección del flujo subterráneo

La dirección general del flujo subterráneo es E–W, con desviaciones en algunas zonas (Pampa de Ñoco y la salida del valle de Ica a Villacurí) en dirección SE–NW. Solamente en el valle de Ica, el flujo subterráneo tiene dirección N–S, por ser controlado por los afloramientos rocosos de borde, que mantienen la misma dirección. El flujo saliente de los acuíferos costeros llega al Océano Pacífico directamente o por medio de acuíferos que se encuentran aguas más abajo.

El gradiente hidráulico varía: En los valles estrechos, entre las laderas occidentales de los Andes y en la parte superior de los demás valles, es generalmente 1 a 1,5^o/o, bajan-



do a 0,2–0,5‰, aguas más abajo y más cerca de la playa (Pérez; 1962, TAHAL; 1964, 1969).

Los gradientes hidráulicos fuertes, por encima de 0,5‰, reflejan la baja transmisividad de los acuíferos, como es evidente en las zonas de Pisco y Lanchas (0,8–1‰) y en las partes marginales bajas del valle de Chicama.

e) Recarga de los acuíferos

En la costa del Perú, que carece de lluvias, la principal fuente de recarga de los acuíferos, es el agua de los ríos que se infiltra y migra lateralmente desde el lecho del río y de los canales. Este fenómeno se demuestra por las convexas isopiezas con respecto a los cauces principales y por el ascenso inmediato en el nivel piezométrico en pozos cercanos a los cauces de los ríos como reacción a escorrentías intermitentes. Otras indicaciones de la importancia de esta fuente son; la baja salinidad y las bajas temperaturas cerca de los cauces de los ríos (Gilboa; 1969, 1971). El mejor ejemplo de este tipo de recarga lo ofrece el valle de Ica que sirve como un reservorio subterráneo operacional, las pérdidas de agua en el río Ica y en los canales de irrigación llegan a un 70–80‰ de la escorrentía total, pero se recuperan por medio de unos 600 pozos en el valle, que dan más de 280 MMC/año (TAHAL, 1969).

El agua subterránea también circula a través de las fallas de borde o por depresiones tectónicas, como ocurre en el acuífero de la Pampa de Villacurí. La Pampa, que carece de lluvias y de escorrentías superficiales, se alimenta del acuífero del valle de Ica, por medio de una abertura en el marco ígneo del valle, de 6 Km. de anchura y 200–300 m. de profundidad (Gilboa; 1969, 1971, 1973).

La recirculación de agua de regadío es otra fuente importante de recarga.

La precipitación sobre la zona y el flujo subterráneo de los Andes están excluidos como fuentes de alimentación de los acuíferos (Gilboa, 1971). La larga y elevada barrera del batolito de los Andes impide la circulación de agua, excepto por los cañones de los ríos. La ausencia de migración lateral a través de la Cordillera de la Costa fue comprobada en las bahías de Carhua y de San Juan (Dpto. de Ica).

f) Calidad del agua subterránea

El agua subterránea en los acuíferos costeros aluviales varía de dulce a salobre, conteniendo desde 400 a más de 10,000 ppm. del total de sólidos disueltos (TSD), o de 50 a más de 3,000 ppm. del ión cloruro (Gráfico 2). El proceso de salinización es similar en

todos los acuíferos aluviales: las aguas en donde domina el bicarbonato cálcico, se enriquecen con cloruro sódico que pasa a ser la sal dominante. Menos de lo cabe esperar, bajo estas condiciones climatológicas, solamente pequeñas cantidades de aguas subterráneas contienen grandes concentraciones de sales. Ello se debe principalmente a recarga continua de agua y a un flujo subterráneo, sin interrupciones, dentro de los acuíferos.

La salinidad del agua subterránea se atribuye a varias causas:

- 1) lavado de minerales en el camino del flujo subterráneo, intensificado por el prolongado contacto con los sedimentos,
- 2) evaporación en áreas con un nivel pizométrico somero,
- 3) flujo a través de capas salinas,
- 4) contribuciones de sales hidrotermales, a través de fallas,
- 5) agua de drenaje,
- 6) sales transportadas por el viento,
- 7) intrusión marina.

Frecuentemente, dos o más de estos factores combinan en aumentar el contenido de sales en el agua subterránea (Gilboa, 1969).

El Mapa 2 y el Gráfico 3 muestran el incremento de la salinidad de las aguas con la dirección del flujo subterráneo, en el valle de Chíncha.

g) Utilización de isótopos en los acuíferos costeros del Perú




Cuando se emplean trazadores en estudios de agua subterránea, su fin es, generalmente, para aclarar los siguientes problemas:

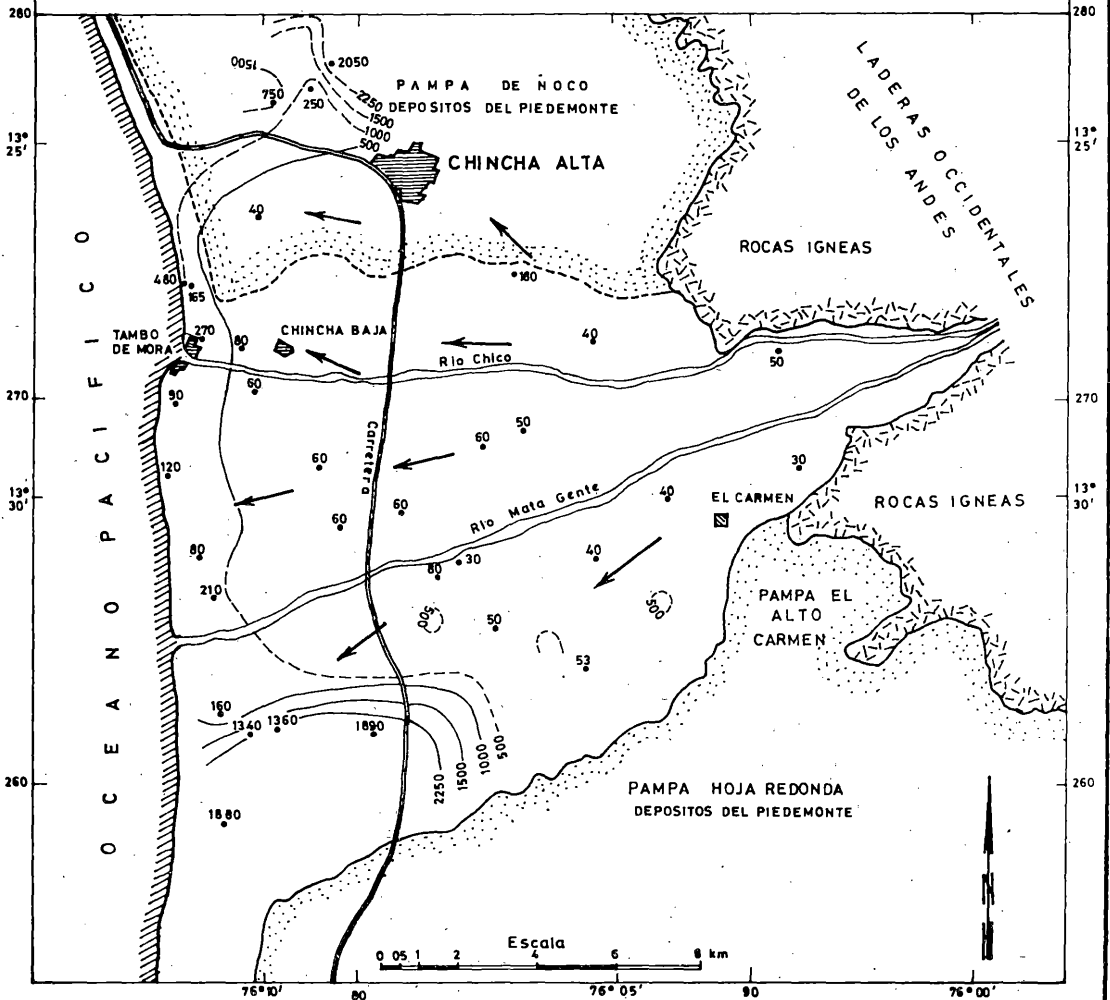
- 1) Las conexiones entre las diferentes cuencas hidrológicas, la dirección y el régimen de flujo en los acuíferos.
- 2) Determinación del origen geográfico y tipo del agua subterránea.
- 3) Determinación de la edad del agua subterránea.
- 4) Determinación de la porosidad y permeabilidad de las capas acuíferas.

Las características generales de los acuíferos deben ser conocidas, antes de aplicar las técnicas de trazadores, ya que éstos se emplean para fines complementarios (IAEA, 1968).

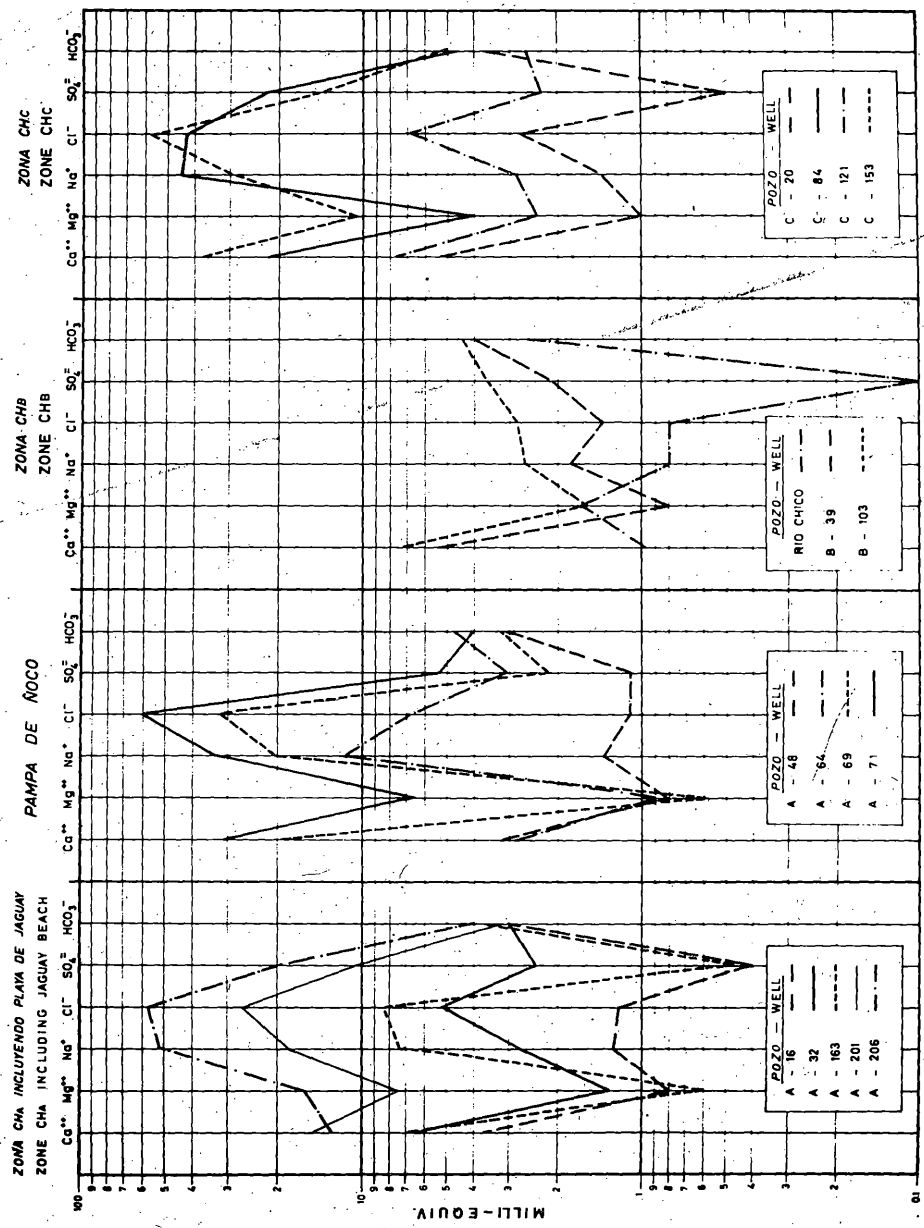
Los acuíferos heterogéneos aluviales en la costa del Perú indican diferenciación lateral y permeabilidad disminuida con la profundidad. La velocidad del flujo subterráneo varía entre diez y varios cientos de metros por año.

VALLE DE CHINCHA DEPARTAMENTO DE ICA - PERU SALINIDAD DEL AGUA SUBTERRANEA

DIRECCION DEL FLUJO SUBTERRANEO 
LINEA DE IGUAL CANTIDAD DEL TOTAL
DE SOLIDOS DISUELTOS (en ppm)  500
CONTENIDO DE CLORURO (ppm)  60



SOLIDOS DISUELTOS DEL AGUA SUBTERRANEA
DISSOLVED CONSTITUENTS OF GROUNDWATER
VALLE DE CHINCHA - CHINCHA VALLEY



(SCHOELLER DIAGRAM)

SEPT. 1967

ACUIFEROS COSTEROS DEL PERU

Por la lentitud de flujo subterráneo y la variabilidad en las características hidrológicas de los acuíferos, trazadores pueden ser empleados, solamente, para la solución de problemas locales. No obstante, la mayor parte de la información sobre el agua subterránea puede ser obtenida por los métodos convencionales cuya ventaja es de ser menos complicados y más baratos. Sin embargo, se llevaron a cabo, a una escala modesta, análisis de los isótopos; Deuterio y Oxígeno 18, para averiguar el origen geográfico del agua subterránea, en el valle de Ica, y para confirmar las conclusiones hidrológicas obtenidas por otros métodos (TAHAL, 1969)(*) (Mapa N° 3).

La fraccionación isotópica ocurre siempre cuando agua cambia de estado, principalmente, por tener los componentes isotópicos pesados, como O₁₈ y Deuterio, una baja presión de vapor. La precipitación en montañas elevadas se caracteriza con un contenido bajo de isótopos estables pesados, comparando con áreas cercanas y más bajas. En general, cuando no existe evaporación se encuentra una correlación directa entre O₁₈ y Deuterio, mientras que si se produce evaporación, se observan desviaciones que indican un exceso de O₁₈ (IAEA, 1968). Por medio de esta correlación es posible averiguar la verdadera causa (altura o evaporación) del aumento en el contenido de O₁₈ (Grafico 4).

En el Gráfico 4, las muestras del agua subterránea (una de Villacurí y cuatro del valle de Ica) aparecen ubicadas más o menos sobre una línea recta mientras que la muestra del río Ica se desvía de la misma.

A la luz de las escasas muestras disponibles, parece existir la posibilidad de que el agua en la parte oriental de la Pampa de Villacurí (pozo V-151), procedente del valle de Ica, se origine a una gran altura, en la cuenca receptora, mientras que el agua de los pozos de la parte baja del valle, ya esté mezclada con aguas de las cuencas receptoras más bajas (de los tributarios del río Ica). Así, el agua de Los Tronquitos, en la parte meridional del valle, contiene más O₁₈ que el agua de la Hacienda Galagarza, en la parte central del valle. La muestra de agua de la Hda. Esmeralda, en la Pampa de los Castillos, tiene un elevado contenido de O₁₈, que parece, que no se debe a evaporación sino más bien a un aparente ingreso de agua del valle de Yauca.

Los resultados concuerdan, pues, con las observaciones geológicas, estructurales e hidrológicas. El agua subterránea del valle, no procede del mismo origen que la muestra del río, ya que la última indica una alta tasa de evaporación. Es claro que esa muestra no puede ser considerada como representativa, del agua superficial del río Ica, puesto que

(*) Seis análisis de los isótopos se han realizado en el Departamento de Isótopos del Instituto Weizman de Ciencias en Rehovot, Israel, y sus resultados han sido interpretados por el Prof. Y. Gat.

76° 00'

75° 36'

MAPA-3

75° 36'

PAMPA DE VILLACURI

Villacuri
151

ROCAS IGNEAS

Muestra de
Rio Ica
Ct. La Cruz

SAN JOSE DE
LOS MOLINOS

14° 00'

14° 00'

GUADALUPE
Ct. Prieto

Rio Ica

ICA

ROCAS IGNEAS

VALLE DE ICA

DEPARTAMENTO DE ICA-PERU

UBICACION DE MUESTRAS
PARA ANALISIS DE ISOTOPOS
(VEASE GRAFICO 4)

ROCAS IGNEAS

SANTIAGO

Galagarza

Esmeralda

Los Tronquitos

ROCAS IGNEAS
LOS CASTILLOS
PAMPA DE
S. PAMERICANA

14° 15'

14° 15'

LEYENDA

DIRECCION DEL FLUJO
SUBTERRANEO



POZO



ESCALA

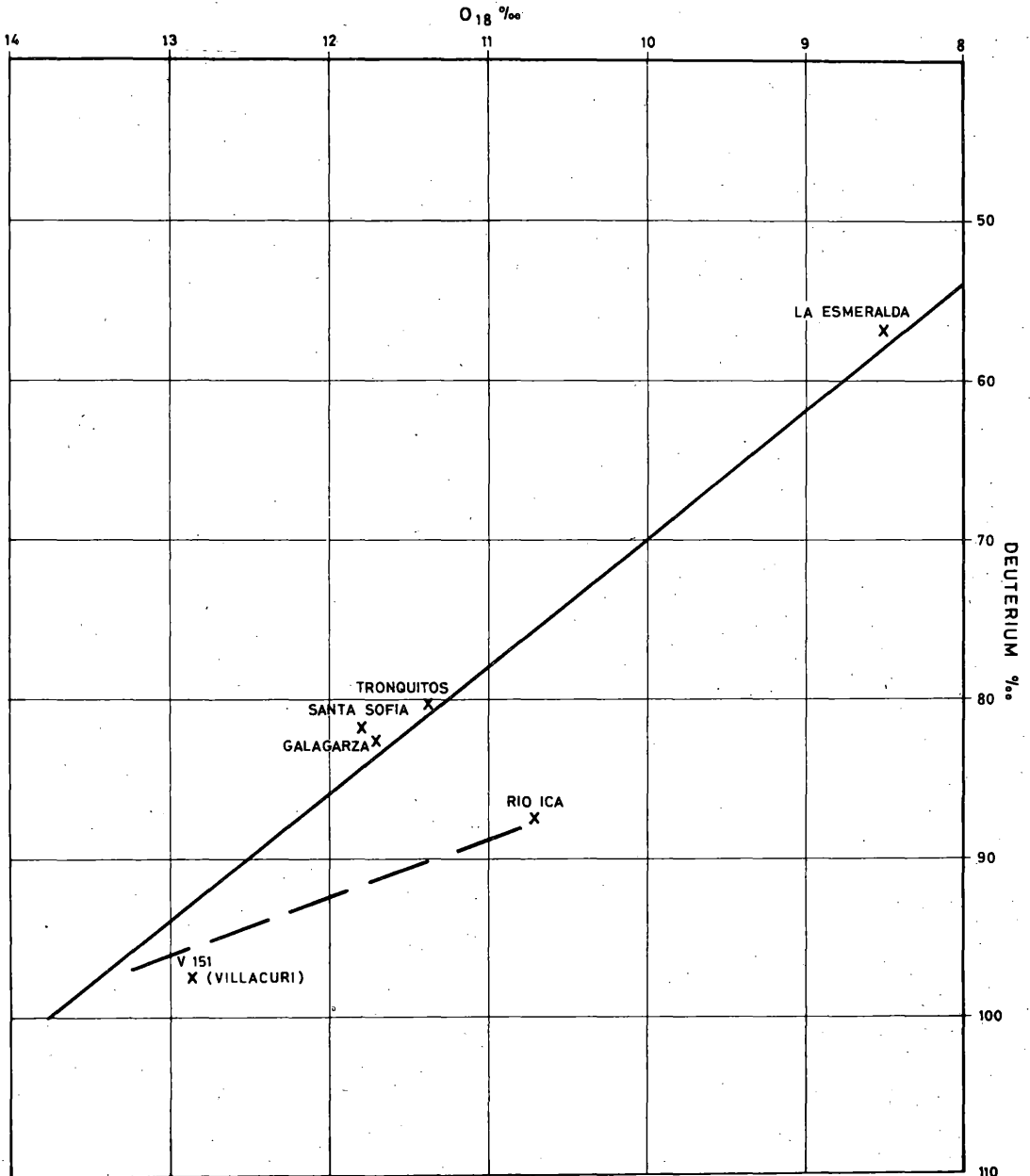


76° 00'

75° 36'

75° 36'

VALLE DE ICA
 RELACION O_{18} DEUTERIO EN MEUSTRAS DE AGUA
 O_{18} DEUTERIUM RELATIONSHIP IN WATER SAMPLES



según se ha averiguado, pudo haberse sometido en sus fuentes a condiciones extremas de evaporación (Laguna Choclococha). Puesto que el agua proveniente de la Laguna Choclococha, ha sido suelta, solamente, desde 1960, es posible que sus aguas filtrantes en el valle no han llegado hasta las capas semiconfinadas de los pozos investigados. Todo esto, llama a un mayor número de análisis de isótopos para establecer un cuadro más fidedigno.

4.— OPTIMIZACION DE LOS RECURSOS HIDRICOS SUBTERRANEOS

Debido al carácter torrencial de los ríos, sus flujos están concentrados durante una corta época, entre los meses de diciembre a abril (Véase Tabla 1). En todos los valles de la costa, los flujos están interceptados por sistemas de captación superficial, proyectadas para puntas medias, o por infiltración en los embalses subterráneos. En las cabeceras de varios ríos existe también un modesto sistema de regulación superficial, mientras que los acuíferos se regulen por medio del bombeo en pozos.

Sin embargo, la capacidad de regulación, superficial y subterránea, es limitada y, exceptuando pocos valles (Ica, Caplina), notables cantidades de agua se pierden anualmente en el Océano.

La optimización de los recursos hídricos subterráneos puede añadir importantes cantidades de agua, con un impacto inmediato sobre el desarrollo del país. Para facilitar tal optimización, es indispensable de determinar el potencial hídrico de todos los acuíferos costeros y confrontarlo con la distribución de los diferentes focos de demanda.

El siguiente esquema propone el orden de operaciones a realizar sistemáticamente a todo lo largo de la costa del Perú (Gráfico 5). Los resultados obtenidos pueden indicar la factibilidad de proyectos que aprovecharán en una manera eficaz y económica los recursos hídricos de la Cuenca Pacífica del Perú. Aunque tales proyectos podrán incorporar áreas relativamente reducidas, su realización ofrece cuatro ventajas:

- a. Postergación de gigantes proyectos de derivación desde la cuenca amazónica, que requieren inversiones substanciales.
- b. Aumentación en la capacidad de regulación de los grandes proyectos de derivación. Los embalses superficiales proyectados en las derivaciones de la Cuenca Atlántica (Olmos, Pampas y Majes) así, como las de costa misma (Tinajones, Jequetepeque y otros) no son suficientes para regular las aguas derivadas. Por otro lado, los mayores volúmenes de los embalses subterráneos pueden aumentar, en una manera notable, la capacidad de regulación.
- c. Utilización de las reducidas áreas incorporadas como estaciones experimentales a gran escala, para anticipar los problemas que pueden surgir con la implementación de las grandes irrigaciones.
- d. Introducción gradual al mercado de diversos productos agrícolas.

El esquema de operaciones, propuesto para cada cuenca, se basa principalmente en la elaboración del balance hídrico detallado, hasta base diario (Gráfico 5). La complementación del balance hídrico requiere la obtención de numerosos y minuciosos datos, como: evapotranspiración efectiva diaria, capacidad de campo diaria como función del riego y de la infiltración en el cauce del río y en los canales, tasas de bombeo, fluctuaciones del nivel freático y las cantidades de agua perdidas en el Océano.

Comparando los valores del balance hídrico en cada cuenca con las tasas de la demanda actual y proyectada, se estudiarán las posibilidades de aprovechar las sobrantes de cada cuenca con los sistemas existentes y/o proyectados, de regulación y de distribución.

Resultando negativa o poco prometedora la evaluación hídrico-económica de la cuenca bajo estudio, se pasará a estudiar las posibilidades de la siguiente. Consideraciones socioeconómicas, geográficas o hidrológicas, determinarán el orden de prioridades en el estudio de las cuencas.

Un estudio de este tipo, cuyo ritmo de realización depende de los recursos invertidos, es esencial para evitar doble trabajo y gastos innecesarios en proyectos no viables. Solamente, cuando la viabilidad del uso de los recursos hídricos totales de una cuenca esté bien establecida, se justifica su financiación.

A continuación se proponen, en una manera preliminar las posibilidades de varias cuencas a lo largo de la costa, llamando atención a diferentes aspectos de la incorporación y de operación de los recursos hídricos subterráneos.

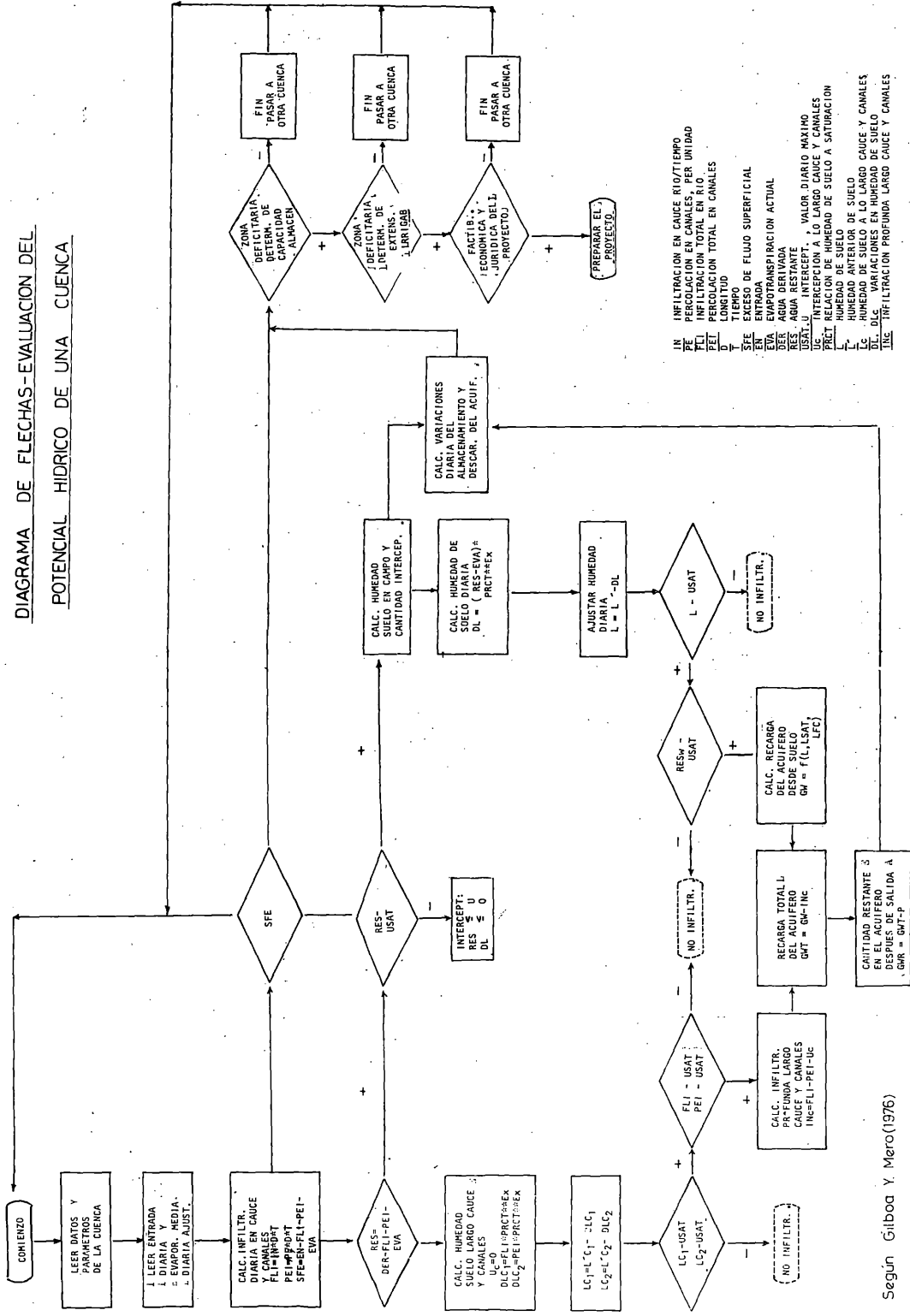
El análisis de los caudales medios de los ríos entre el desierto de Sechura en el norte hasta Tacna en el sur, indica que unos ríos tienen caudales menores o insignificantes, como: La Leche, Virú, Nepeña, Casma, Huarmey, Moquegua, Sama y Caplina. No se justifican derivaciones de estos valles, si no en caso de escases de tierras dentro del valle mismo. Río Ica cae también dentro de esta categoría, puesto que el aprovechamiento de sus propios recursos hídricos es completo, sin dejar sobrantes para exportación.

Cuencas que posiblemente contienen aguas sobrantes, disponibles para cualquier uso viable, incluyen entre otras las de: Pativilca, Chancay, Mala, Cañete, Pisco y Yauca. De éstas, se discutirán en más detalles.

En Cañete, las avenidas cubren la demanda con un menor suplemento de bombeo, siendo notables las cantidades de agua perdidas en el Océano. Estas últimas pueden ser derivadas hacia la parte norte de la Pampa de Ñoco, alrededor de la Quebrada de Topara. La regulación de las cantidades derivadas, puede realizarse por medio de aumento del bombeo en pozos en el propio Valle de Cañete.

El costo del bombeo será reintegrado por las nuevas irrigaciones, a los dueños o titulados del agua de las avenidas. Así, mientras siempre se mantienen los derechos legales y las prioridades de los titulados, se puede abrir el camino a un manejo flexible y eficiente de los recursos hídricos totales de la cuenca.

DIAGRAMA DE FLECHAS-EVALUACION DEL
POTENCIAL HIDRICO DE UNA CUENCA



INFILTRACION EN CAUCE R10/TIEMPO
 PE PERCOLACION EN CANALES, PER UNIDAD
 FLL INFILTRACION TOTAL EN RIO
 INC INFILTRACION TOTAL EN CANALES
 DL LONGITUD
 T TIEMPO
 SFE EXCESO DE FLUJO SUPERFICIAL
 EN ENTRADA
 EVA EVAPOTRANSPIRACION ACTUAL
 AGUA DESTINADA
 PEI PERCOLACION EN CAUCE
 PEI=PEI+PEI-EVA
 USAT INTERCEPT. VALOR DIARIO MAXIMO
 INTERCEPCION A LO LARGO CAUCE Y CANALES
 RELACION DE HUMEDAD DE SUELO A SATURACION
 HUMEDAD DE SUELO
 HUMEDAD ANTERIOR DE SUELO
 HUMEDAD DE SUELO EN CAUCE Y CANALES
 VARIACIONES EN HUMEDAD DE SUELO
 INC INFILTRACION PROFUNDA LARGO CAUCE Y CANALES

ACUIFEROS COSTEROS DEL PERU

Más al sur, se ve la posibilidad de derivar las aguas sobrantes del río Pisco hacia la Pampa de Villacurí. Una derivación, como la propuesta, combina el riego por avenidas y la recarga artificial de un importante acuífero. Este, a su vez, puede servir como un gran embalse regulador, aumentando la capacidad de regulación del proyecto de derivación del río Pampas. Además, la derivación ofrece tres de las ventajas mencionadas arriba; postergación de grandes inversiones, estación experimental e introducción gradual de productos.

Por falta de capacidad de almacenamiento adecuada en las cuencas de Ocoña y Tambo, se excluyen éstas de la categoría de las cuencas potencialmente regulables.

Siguiendo este concepto, las derivaciones a tierras nuevas se justifican económicamente al encontrar, en su subsuelo, acuíferos potenciales con considerable capacidad de almacenamiento. Las fuentes de recarga de estos embalses subterráneos serán la percolación en los canales y las pérdidas de riego.

Como ejemplo, se puede notar la Pampa de Huallurí, al sur del Valle de Ica, que ofrece las posibilidades de servir como receptor de las aguas traídas desde el río Pampas. Una vez, confirmada la existencia de capas permeables en el subsuelo de dicha pampa, se abre el camino de aumentar la dotación de agua hacia ella. La tasa de agua, originalmente destinada a la Pampa de Villacurí, puede ser reemplazada por aguas derivadas desde el río Pisco.

Los ejemplos presentados, demuestran que el potencial de los recursos hídricos en la Costa Peruana, todavía ofrece posibilidades para el desarrollo futuro. Para poder incorporar cantidades, aún no explotadas así como las importadas de la cuenca atlántica, es indispensable reconstruir el modelo hidrogeológico. El modelo incluirá todas las capas acuíferas. La evaluación de las aguas sobrantes disponibles y la viabilidad de su uso serán el resultado del conocimiento detallado del modelo propuesto.

BIBLIOGRAFIA

- BELLIDO E., NARVAEZ, SIMONS F., 1956, Mapa Geológico del Perú (escala aprox. 1:2.000.000) Sociedad Geológica del Perú.
- CONKLING H., 1938, Explotación de Aguas Subterráneas en la Costa del Perú. Soc. Nacional Agraria. Lima.
- GILBOA Y., 1969, The Groundwater Geology in the Rainless Coastal Area of Peru, Ph. D. Thesis, Hebrew University of Jerusalem.
- ., 1971, Replenishment Sources of the Alluvial Aquifers of the Peruvian Coast, Groundwater, July—August.
- ., 1973, La Recarga de los Acuíferos en las Pampas de Villacurí y de Lanchas, Departamento de Ica, Bol. Soc. Geológ. del Perú, Tomo 43, 1.
- ., Mero F., Mariano I. B., 1976, The Botucatu Aquifer of South America, Model of an untapped Continental Aquifer, Jour. of Hydrology, 29.
- HANRECK R., 1964, Hidrogeología del Sector Bajo del Valle del río Piura, Informe Preliminar, Minist. de Agricultura, Perú.

- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), 1968, Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology, Tech. Serv. N° 91.
- INTERNATIONAL ENGINEERING Co. (IEC) AND CHAVEZ DIAZ, 1966, Plan Regional para el Desarrollo Económico y Social de la Región comprendida por los ríos Ica y Pisco, INP y CRYDI, Perú.
- ITALCONSULT, 1966, Irrigation of the Pampas de Olmos, Spec. Fund-FAO United Nations.
- JENKS W., 1956, The Geology of Peru, Geol. Soc. of America. Mem. 65.
- JUNTA DE CONTROL DE ENERGIA ATOMICA, 1965, Proyecto de Desalinización de Agua y Generación Eléctrica en la Costa del Perú.
- MERO F., 1969, An Approach to Daily Hydrometeorological water Balance Computations for Surface and Groundwater Basins, Proc. ITC-UNESCO, Seminar for Integrated River Basin Development.
- PEREZ V. C., 1962, Estudio Hidrogeológico de las Pampas de Hospicio y La Yarada de la Provincia de Tacna, I.N.I.F.M., Perú.
- ., 1966, Estudio Hidrogeológico, Valles de Moquegua e Ilo, I.N.I.F.M.
- PETERSEN G., ALBERCA A., 1954, Sobre las Condiciones de Agua del Subsuelo en el Valle de Tacna, Empresa Petrolera Fiscal, Bol. Tec. N° 2.
- ., 1956, Hidrogeológica de Río Chancay, Lambayeque, Bol. Soc. Geol. Perú, Tomo 30.
- SAYAN J. L., 1964, El Agua Subterránea de la Zona de Lima, B. Sc. Thes. Univ. Nacional Mayor de San Marcos.
- SCHOFF S.L., 1956, Cuántas Aguas Subterráneas tiene el Perú, Bol. Soc. Geol. Perú, Tomo 30.
- ., Sayan J. L., 1959, Groundwater Resources of the Lambayeque Valley, Peru, U.S.G.S. and Serv. Cooper. Interamer. de Irrig. del Perú.
- SERVICIO DE AGROMETEOROLOGIA E HIDROLOGIA (SAH), 1962-1966, Boletines de Estadística, Meteorología e Hidrología, Nos. 1-28, Minist. de Agricultura.
- SOLIGNAC M., 1959, Investigación de las Aguas Subterráneas de las Zonas de la Costa y de la Sierra, Prog. Ampliada de Assist. Técnica, FAO, N° 1268.
- TAHAL (CONSULTING ENGINEERS LTD.), 1964, Lambayeque-Jayanca Groundwater Development Project, Feasibility Report, Banco de Fomento Agropecuario del Perú.
- ., 1966, Proyecto Nazca-Estudio para el Desarrollo de las Aguas Subterráneas y la Agricultura, CRYDI, Perú.
- ., 1968, Chavimoché Project Area, Reconnaissance Report, CORLIB, Perú.
- ., 1969, Los Recursos de Agua Subterránea del Departamento de Ica, Informe de Reconocimiento, CRYDI, Perú.
- TALTASSE P., 1963, Les Eaux Souterraines de la Zone Aride Cotière du Pérou, La Technique de l'eau, N° 20.