

**PROBLEMAS DE DRENAJE Y SALINIDAD
EN LA COSTA PERUANA**

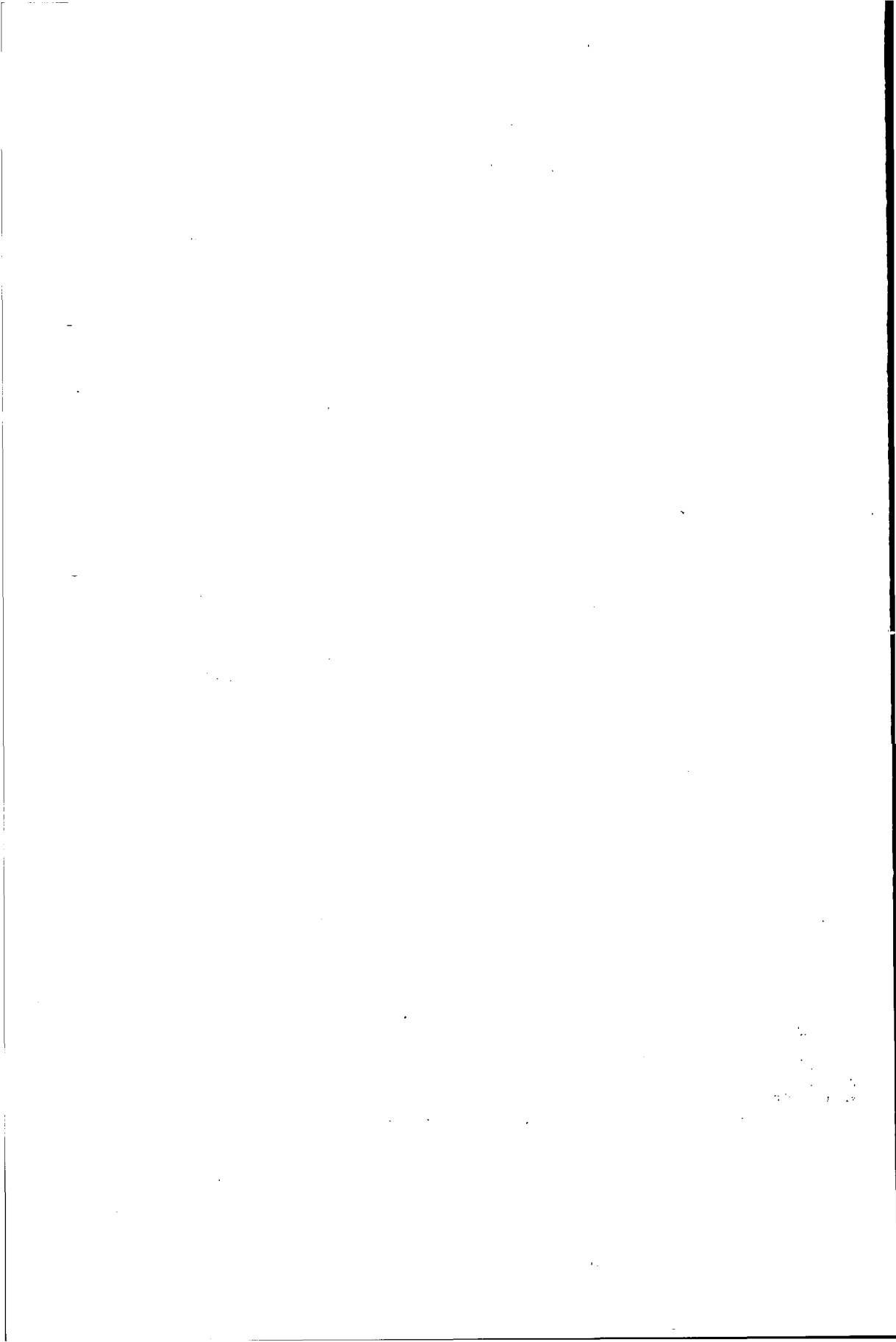
Bulletin 16

PROBLEMAS DE DRENAJE Y SALINIDAD EN LA COSTA PERUANA

C. A. ALVA
J. G. van ALPHEN
A. de la TORRE
L. MANRIQUE



INTERNATIONAL INSTITUTE FOR LAND RECLAMATION AND IMPROVEMENT/ILRI
P.O. BOX 45 WAGENINGEN THE NETHERLANDS 1976



Prefacio

En el año 1968 se inició el proyecto CENDRET - Centro de Drenaje y Recuperación de Tierras - un proyecto de cooperación técnica entre el Perú y los Países Bajos.

La meta principal ha sido la formación de técnicos peruanos especializados en el drenaje de tierras agrícolas. Para cumplir esa meta se desarrolló una serie de actividades, tales como investigaciones básicas de drenaje, la evaluación de la magnitud del problema de drenaje y salinidad en la Costa Peruana, y la instalación de áreas pilotos de drenaje para hacer estudios aplicados sobre la técnica de instalación de drenes, materiales de drenaje y la recuperación de suelos salinos. Además, se ha organizado cursos de drenaje de tierras agrícolas en los cuales han participado ingenieros peruanos y extranjeros.

A partir del año 1972 el proyecto CENDRET entró en la fase de la ejecución de un proyecto de drenaje de mayor escala.

El proyecto CENDRET se finalizó en el año 1974; un año después de su incorporación en la Dirección de Preservación y Conservación del Ministerio de Agricultura.

El personal técnico peruano creció desde 5 ingenieros en el inicio hasta más de 20 al finalizarse el proyecto. De parte de los Países Bajos han participado 7 ingenieros en total.

Los resultados de los diferentes investigaciones y estudios realizados han sido publicados en informes técnicos y tesis para optar el título de ingeniero agrícola de la Universidad de La Molina. La presente publicación solamente es un resumen de todo el material disponible. Aunque parecen los nombres de cuatro autores en las guardas, este trabajo es el resultado de una cooperación sólida entre peruanos y holandeses, cooperación que se ha desarrollado en un estrecho lazo de amistad.

Cabe consignar que este trabajo se ha subdividido en dos partes:

- I. MAGNITUD DEL PROBLEMA DE DRENAJE Y SALINIDAD
EN LA COSTA PERUANA
- II. EXPERIMENTOS DE RECUPERACION DE SUELOS
SALINO-SODICOS

I. MAGNITUD DEL PROBLEMA DE
DRENAJE Y SALINIDAD EN
LA COSTA PERUANA

Contenido

1	LA COSTA PERUANA	9
1.1	Generalidades	9
1.2	El clima	9
1.3	La geología	10
1.4	La hidrología de los ríos	11
1.5	El riego y la agricultura	13
1.6	Proyectos de riego	14
2	EL PROBLEMA DE DRENAJE Y SALINIDAD	16
2.1	Origen del problema de drenaje	16
2.1.1	Cono de deyección	16
2.1.2	Valle encajonado	19
2.1.3	Falla geológica en el Valle del Río Pisco	19
2.2	El problema de drenaje en la agricultura	20
2.3	El problema de salinidad en la agricultura	21
3	EVALUACION DEL PROBLEMA DE DRENAJE Y SALINIDAD	23
3.1	Generalidades	23
3.2	Criterios de evaluación	23
3.2.1	Drenaje	23
3.2.2	Salinidad	24
3.2.3	Otros criterios	25
4	MAGNITUD DEL PROBLEMA DE DRENAJE Y SALINIDAD EN LA COSTA PERUANA	28
5	POSIBILIDADES DE RECUPERACION	32
	BIBLIOGRAFIA	36
	Por Contenido de la Parte II ver	43

1. La Costa Peruana

1.1 Generalidades

El Perú está situado en el oeste de Sur America entre los paralelos $0^{\circ}02'$ y $18^{\circ}21'$ de latitud sur. Tiene una superficie de $1,285,215 \text{ km}^2$.

Su relieve es muy accidentado por la presencia de la Cordillera de los Andes que divide el país en tres regiones naturales:

- la Costa
- la Sierra
- la Selva.

La Costa es una estrecha faja que se extiende entre el Océano Pacífico en el oeste y los contrafuertes de la Cordillera Occidental de los Andes en el este. Tiene un ancho variable de 50 a 100 km, y su superficie abarca unos $136,000 \text{ km}^2$ (10% del territorio nacional).

1.2 El clima

El clima en la costa peruana está dominado por dos factores: la presencia de la Corriente de Von Humboldt y la Cordillera de los Andes. Las aguas frías de la Corriente de Von Humboldt evitan la formación de nubes a una altura suficiente para que dé origen a lluvias. La Cordillera de los Andes por otro lado es una barrera alta que impide el paso de las nubes de la Cuenca Amazónica. El resultado es la escasa ó nula precipitación en la Costa.

Durante los meses de invierno (mayo a noviembre) se forma sobre la Costa Peruana entre los 200 a 750 m.s.n.m. una neblina. Esta neblina no da origen a una precipitación, sino mantiene la humedad relativa muy elevada. En los meses de verano (diciembre a abril) normalmente no se presenta éste fenómeno.

La precipitación en la costa varía entre 0 y 40 mm/año salvo en el extremo Norte donde fluctúa entre 75 y 300 mm. La ultima región está bajo la influencia de la Corriente del Niño, cuyas aguas son cálidas.

La precipitación en la zona de los contrafuertes de la Cordillera de los Andes es mucho mayor. Así tenemos que en el norte a más de 200 m_s de altura y en el sur a más de 2,500 m, la precipitación anual fluctúa entre 250 y 750 mm.

En la estación de Tarata (3,170 m.s.n.m.) en la Costa Sur, la precipitación anual es de 380 mm, y en la Estación de la Represa San Lorenzo (300 m.s.n.m.), en la Costa Norte, la precipitación anual es de 310 mm. Las lluvias en éstas alturas

normalmente caen en los meses de diciembre a abril y son suficiente para producir una escorrentía que luego alimenta los ríos. Por encima de los 5,000 m.s.n.m. las precipitaciones se manifiestan en forma de nieve.

La temperatura media de la Costa decrece de norte a sur desde 26 °C en la Estación de Tumbes a 18 °C en la Estación de Tacna. La temperatura media mensual en Tumbes varía entre 23 °C en el mes de agosto hasta 27.5 °C en el mes de marzo. La variación en la temperatura media mensual en Tacna es desde 13 °C en el mes de julio, hasta 22 °C en el mes de febrero.

La evaporación anual en Tumbes llega a 1,800 mm, mientras que en Tacna llega a 1,200 mm. Comparando los datos de evaporación y precipitación se llega a la conclusión que el clima varía de desértico a semidesértico en la Costa y sub-húmedo en las contrafuertes de la Cordillera de los Andes.

1.3 La geología

Desde Cajamarca por el norte hasta Ocoña en el sur, el contrafuerte occidental de la Cordillera de los Andes está compuesto de rocas ígneas. Es un batolito intrusivo del Cretácio superior - Terciario inferior.

Los extremos norte de Cajamarca y sur de Ocoña consisten de formaciones volcánicas-sedimentarias de la misma edad o más joven (Fig.1).

Al sur de Pisco existe una Cordillera Costera de poca altura, con picos hasta 1,500 m.s.n.m., bastante insignificantes en comparación con cumbres 4,500 a 6,000 m.s.n.m. en los Andes. Esta Cordillera Costera consiste de rocas sedimentarias del Precambrio y Paleozoico.

Sobre las rocas ya mencionadas se encuentran sedimentos pocos consolidados del Cuaternario. Son sedimentos de piedemonte, terrazas marinas y del río y tienen un espesor variable hasta 200 m.

El agua que cae sobre los contrafuertes drena hacia el Pacífico a través de una serie de ríos y quebradas, diferenciándose por lo menos 52 cuencas hidrológicas, 40 de las cuales se ve en la Figura 2. La morfología de los ríos está determinada por la estructura geológica, es decir fallas geológicas en dirección este-oeste hasta noreste-suroeste y por movimientos tectónicos recientes, tanto del tipo de emersión como de subsidencia.

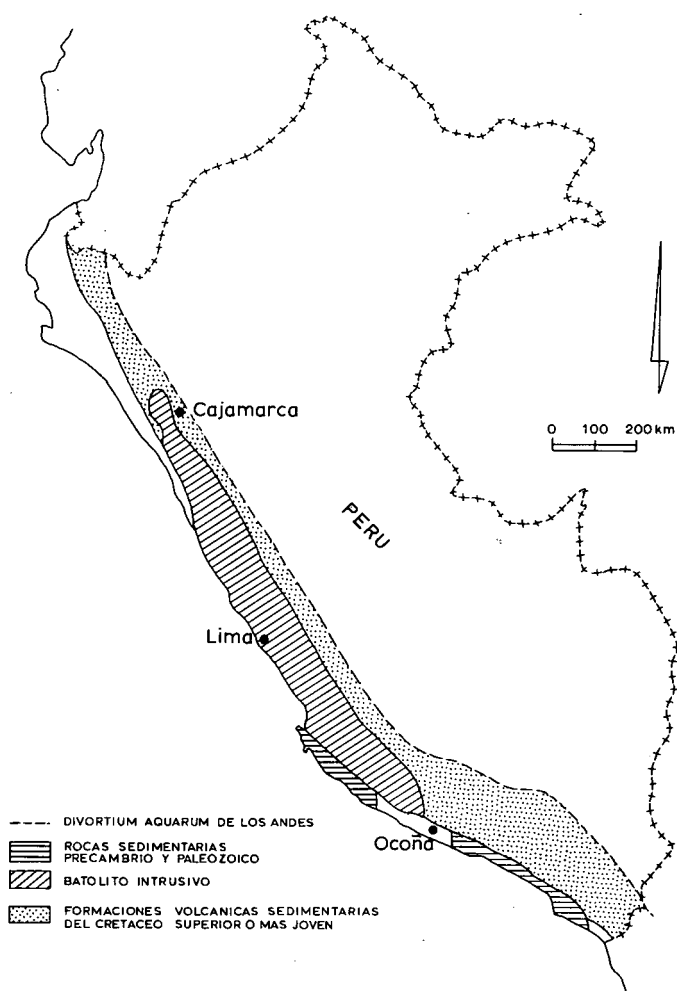


Fig.1. Croquis geológico.

1.4 La hidrología de los ríos

Los 52 ríos existentes (ver Fig.2) en la Costa Peruana descargan anualmente una masa de 40,000 millones de m^3 de agua (CORNEJO, 1971). Las descargas, sin embargo son torrenciales y el 80% de ésta ocurre en los meses de enero, febrero y marzo, época que coincide con las lluvias en la zona alta de la Costa. La época de estiaje comprende los meses de junio a diciembre, cuando la mayoría de los ríos se secan completamente o casi completamente.

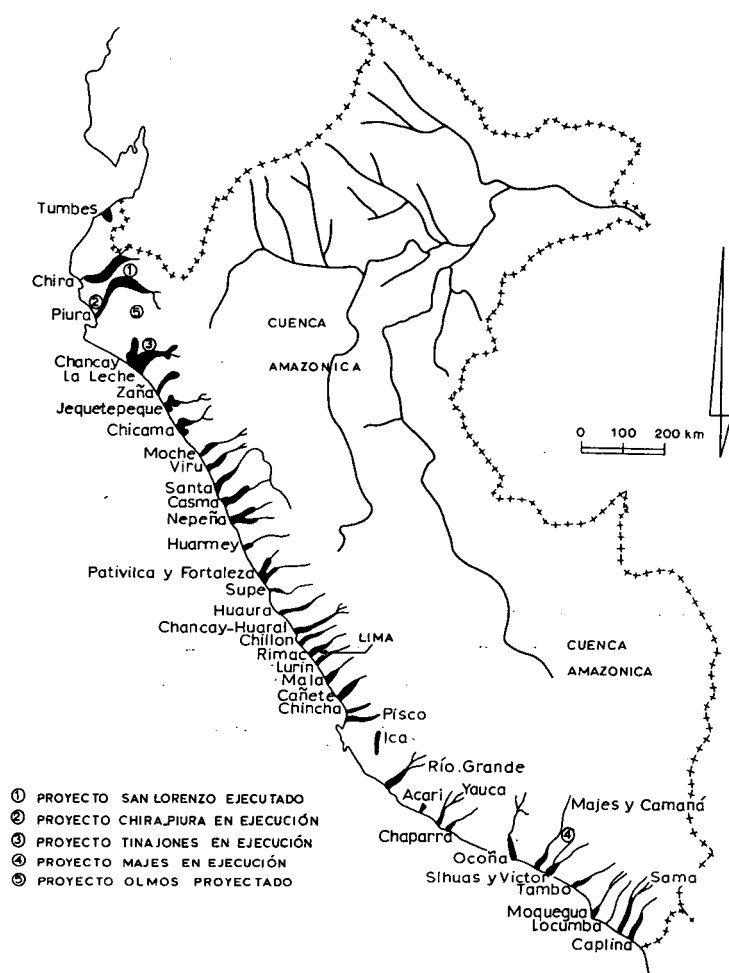


Fig.2. Cuencas hidrológicas y proyectos de irrigación en la Costa Peruana.

Solamente ocho ríos muestran en la época de estiaje una descarga regular: el río Tumbes, Chira, Chancay (Lambayeque), Santa, Rimac (regulado con fines hidroeléctricos y del servicio doméstico de la Ciudad de Lima), Cañete, Majes y Tambo.

En la Figura 3 se demuestra los hidrogramas de las descargas promedios y mínimas de los ríos Chira y Piura (IECO, 1968).

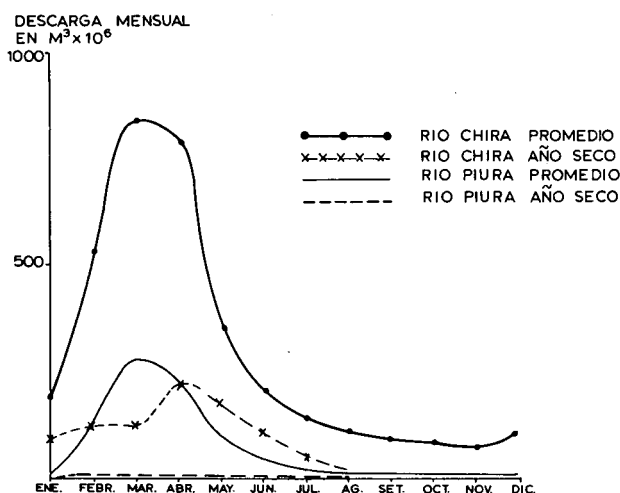


Fig.3. Hidrogramas de descargas de los ríos Chira y Piura.

1.5 El riego y la agricultura

Las condiciones desérticas en la Costa Peruana hacen que la agricultura se desarrolle únicamente por riego. El área empadronada con derechos de riego es de 732,000 ha aproximadamente (CORNEJO, 1971), pero la superficie de labranza es menor. En todo el territorio peruano el área total cultivada es del orden de 2.1 millones de ha, del cual 700,000 ha se encuentran en la Costa.

La importancia del agro de la Costa se puede observar a través del valor económico de la producción agrícola. Casi el 50% de ésta, o sea US \$ 277,500,000, se obtiene en ésta zona. El valor promedio de la tierra por ha es de US \$ 400 en la Costa y la mitad en la Sierra. Esta diferencia se debe a una serie de factores: clima, suelos, topografía, comunicaciones y comercialización. Los suelos de la Costa normalmente son más profundos que en la Sierra, aunque hay muchos suelos arenosos. Las pendientes son suaves y con el riego es posible controlar la humedad en el suelo. La tecnología agrícola es también más desarrollada en la Costa y existe una red de centros de acopio y comercialización, además de buenas vías de acceso. El único factor que afecta seriamente la producción agrícola de la Costa es el agua. Principalmente debido a la irregularidad de las descargas y/o tardanzas de la lluvias de la región de los contrafuertes andinos. Otras veces se producen fuertes avenidas que inundan extensas áreas agrícolas.

Los cultivos principales en la Costa son la caña de azúcar, el algodón, arroz, maíz, alfalfa, papa, frijol y una gran variedad de frutales y hortalizas. La

azúcar de caña y el algodón son los productos importantes de exportación. En el Cuadro 1 se puede observar los rendimientos de algunos cultivos obtenidos en varios valles de la Costa.

1.6 Proyectos de riego

De la descarga total de los ríos (40,000 millones de m^3) solamente el 20% es usado con fines de riego, perdiéndose el resto en el mar. Entonces, teóricamente es posible incrementar el área bajo cultivo. Sin embargo, debido a las grandes fluctuaciones en las descargas, tal incremento del área cultivada está supeditado a la construcción de represas y otras obras hidráulicas de regularización de los ríos.

En la actualidad se están realizando varios proyectos de ésta naturaleza, como son (Fig.2):

- el proyecto de Tinajones, cuyo objetivo es mejorar el riego, realizar obras de drenaje e incrementar el área bajo cultivo de 60,000 a 100,000 ha, en el Valle del río Chancay (Lambayeque). Ya se ha terminado la construcción de una represa con un volumen de embalse de 300 millones de m^3 en un vaso natural al costado del valle mismo. Este proyecto incluye también en una 2da etapa la derivación de agua de la Cuenca Alta del Amazonas;

- el proyecto de Irrigación de San Lorenzo, que casi ha sido finalizado. Está formado por el reservorio de San Lorenzo en un vaso natural sobre el río Chipillico, con un volumen de embalse de 280 millones de m^3 . Recibe aguas derivadas del río Quiroz a través del Chipillico (afluentes del río Chira). En su primera etapa permite riego de 24,000 ha de tierras anteriormente sin cultivar y mejorar el riego de un área similar en la parte media y baja del Valle del río Piura;

- el proyecto Chira-Piura de reciente iniciación incluye la construcción de una represa con volumen de embalse de 1,000 millones de m^3 sobre el río Chira y la construcción de un canal de derivación de 54 km, de longitud con una capacidad de 70 m^3 /seg desde el río Chira hasta el río Piura. Su principal objetivo es mejorar el riego de unas 115,000 ha, ejecutar obras de drenaje en los Valles de Chira y Piura e incorporar 35,000 ha de nuevas tierras a la agricultura;

- el proyecto de Majes en el sur del Perú, cuyo objetivo es el riego de unas 60,000 ha de tierras nuevas en las pampas de Majes y Sihuas. Es un proyecto complejo que incluye la derivación de las aguas de la Cuenca Alta del río Apurímac (Cuenca Amazónica) hacia la vertiente del Pacífico, la construcción de una serie de represas y de tres centrales hidroeléctricas. Este proyecto recientemente ha entrado en ejecución.

CUADRO 1

RENDIMIENTO EN kg/ha DE LOS PRINCIPALES CULTIVOS EN LOS MAS IMPORTANTES VALLES DE LA COSTA PERUANA

Valle y año	Caña de azúcar	Algodón	Maíz grano	Arroz	Papa	Alfalfa
Chancay-La Leche ² (1970-1971)	130,000	1,620		4,400		
Chicama ¹ (1970-1971)	188,000	1,900	3,100	5,000	15,500	30,500
Chancay-Huaral ¹		1,880	4,000		16,000	
Nepeña, Santa, ¹ Lacramarca	180,000	1,840	3,500	5,800		41,000
Virú ¹ (1971-1972)	120,000		3,200			48,000
Cañete ¹ (1968-1969)		2,070	4,300		17,000	48,000
Chincha ¹ (1968-1969)		1,850	4,500		15,000	48,000
Pisco ¹ (1968-1969)		1,600	3,300		12,000	40,000
Ica ¹ (1968-1969)		1,970			15,500	48,000
Camaná ¹ (1971-1972)			2,800	8,000		
Majes ¹ (1971-1972)	80,000	1,750	3,100	5,600	13,900	56,000

¹ Fuentes: Informes sobre el Inventario, Evaluación y Uso racional de los recursos naturales de la Costa, hechos por ONERN

² Fuentes: Ministerio de Agricultura, Zona Agraria II, Memoria 1971

2. El problema de drenaje y salinidad

2.1 Origen del problema de drenaje

La mayoría de los problemas de drenaje de la Costa Peruana están relacionados con las características geomorfológicas y geogenéticas. Las zonas problema normalmente están localizadas en las partes bajas de los valles. El exceso de agua tiene su origen en la parte alta y media del valle, llegando a la parte baja mayormente por vía subterránea.

La fuente principal de recarga de agua en la parte alta es la infiltración a lo largo del río. Esto se puede observar en los contornos isopiezométricos. También la calidad del agua subterránea puede ser una indicación de que existe alimentación desde río: en la franja cercana al río la salinidad del agua freática es semejante al agua del río aumentando su concentración conforme se aleja del cauce.

Otras fuentes de recarga son las pérdidas de los canales y las pérdidas profundas en los terrenos regados. En un estudio realizado en el Valle de Chancay-La Leche, TAHAL (GILBOA, 1971) ha encontrado pérdidas de 1.25% por km de canal, mientras SALZGITTER (1963) llegó a valores de 3 a 4% por km en algunos sectores del canal Taymi, siendo éste uno de los canales madres en el mismo valle. Con respecto a las pérdidas de agua de riego en el campo, PETERSEN (1956) llegó a valores de 10 a 30% del volumen de agua aplicada.

En la Costa Peruana algunos ríos después de cruzar la Cordillera Occidental han formado un cono de deyección, mientras que otros discurren por un valle encajonado. Para un mejor entendimiento del origen del problema de drenaje se presenta una breve descripción de las condiciones hidrogeológicas de un cono de deyección y de un valle encajonado. Además se incluye un problema especial que se presenta en el Valle del río Pisco, donde el drenaje natural en la parte media del valle es muy reducido por la presencia de una falla geológica.

2.1.1. Cono de deyección

Un cono de deyección se forma cuando un río pasa de una zona de mucha pendiente a una con poca pendiente.

En zonas áridas o semiáridas se puede diferenciar entre materiales depositados por el río (materiales fluviales) y aquellos depositados por un flujo barroso o aluvión.

La textura del material fluvial normalmente es bien definida. En la parte alta donde el agua del río discurre con mayor velocidad se deposita solamente piedras, grava y arena y los depósitos tendrán buena conductividad hidráulica. En la parte baja, al contrario, los sedimentos son de textura fina (limos y arcillas). También existe cierta distribución lateral originado por fuertes avenidas, que inundan extensas áreas laterales. A mayor distancia del cauce los sedimentos que se depositan son más finos. Todos éstos sedimentos finos tienen normalmente una conductividad hidráulica reducida.

Los sedimentos del flujo barroso tienen una textura muy variada: están constituidos de grava (angular a subangular) mezclada con arena, limo y arcilla. La conductividad hidráulica es regular a baja.

La formación de un cono de deyección, sin embargo, no es simplemente una secuencia de sedimentos del tipo fluvial y del flujo barroso. En el punto donde emerge el río de los últimos contrafuertes de la Cordillera, ésta tiende a bifurcarse en varios ramales. Además hay que tomar en cuenta que durante el Pleistoceno hubo varios ciclos de erosión y sedimentación por cambios climatológicos (glaciales e interglaciales). También hubo movimientos tectónicos, tanto de emergencia como de subsidencia, que han tenido su efecto en la formación de un cono de deyección.

Una sección transversal bastante simplificada de un cono de deyección se puede observar en la Figura 4.

Las condiciones hidrológicas son distintas en la parte alta, media y baja del cono de deyección. En la parte alta, el nivel freático normalmente está profundo y el agua subterránea se presenta en estado no confinado. Es una zona de recarga de agua por pérdidas del río, infiltración de los canales de riego y percolación profunda de los campos.

Agua abajo existe una zona de transición cuyo substratum tiene capas poco permeables. La recarga va hacia el acuífero freático. El agua en estratos más profundos está semi-confinado. Debido a que la pendiente del terreno es mayor que del nivel piezométrico y que del nivel freático, la profundidad de éstos últimos es cada vez menor.

En la zona más baja el agua en el acuífero profundo está bajo presión. Existe entonces, un flujo vertical hacia la superficie del terreno, alimentando el acuífero freático (zona de descarga). El nivel freático está a poca profundidad y es en ésta zona donde se manifiestan los problemas de drenaje.

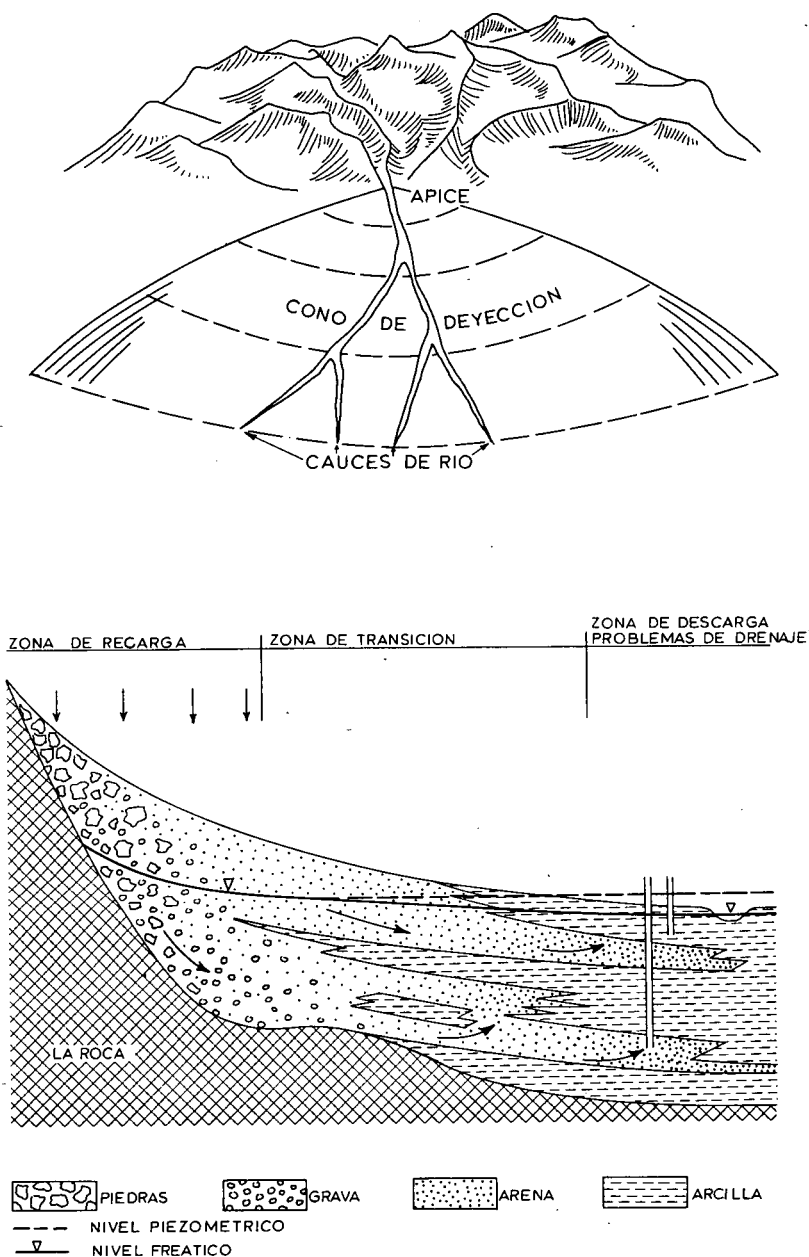


Fig.4. Estructura de un cono de deyección.

2.1.2 Valle encajonado

Los valles en el sur del Perú son angostos y encajonados a lo largo de todo el recorrido del río. El ancho varía entre 200 y 2,000 m. Algunos ríos, como el Camaná y Tambo, han formado una especie de pequeño delta en su desembocadura al mar. Estos valles encajonados probablemente se han formado durante el levantamiento epirogénico de los Andes en forma de un "horst" gigante que comenzó en el Plioceno y continúa en la actualidad (BELLIDO, 1969). Los ríos son del tipo entrecruzado, tipo que se forma cuando existen diferencias marcadas entre la descarga básica y la descarga máxima en época de avenida. En esa época el agua transporta mucho material grueso (piedras, grava). Después de la avenida en el cauce del río quedan islas de piedras y grava, que obligan a que el agua discurra por varios brazos concurrentes de menor importancia (entrecrucamiento). Además del fenómeno de entrecruce el cauce oscila a través de los años de un lado hacia el otro, erosionando terrenos cultivados a un lado y dejando terrenos nuevos en forma de terrazas bajas en la otra ribera.

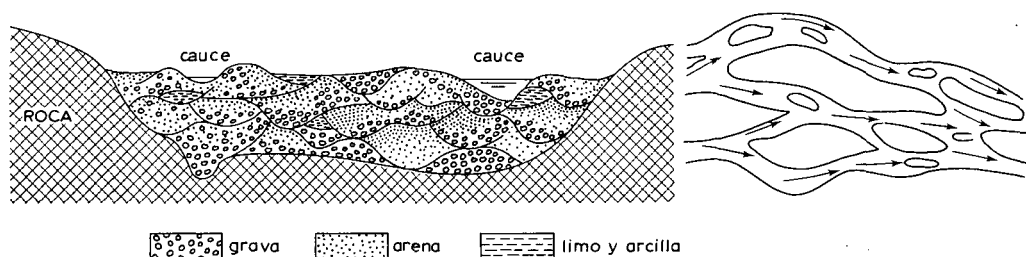


Fig.5. Sección transversal y vista aérea de un río del tipo entrecruzado.

Una sección transversal se puede observar en la Figura 5. El fondo del valle sobre la roca normalmente está compuesta de material grueso y permeable, mientras que los suelos en las terrazas bajas tienen una textura más fina (FrL, FrA, Fr). Debido a la textura gruesa del material depositado por éstos ríos de cauces entrecruzados, el acuífero de los mismos está en contacto hidráulico con el río. Normalmente la napa freática se mantiene a muy poca profundidad (1 a 3 m), y la salinidad del agua freática es parecida al agua del río.

2.1.3 Falla geológica en el Valle del río Pisco

En el Valle del río Pisco se presentan problemas de drenaje tanto en la parte baja como en la parte media. Las razones principales para éstos problemas son dos:

- la existencia de una falla geológica en la parte baja del valle, y
- un proyecto de riego en la parte alta que se encuentra sobre sedimentos de textura muy gruesa.

A una distancia de 2 a 6 km, este de la Costa, existe una falla geológica monoclinial compuesta por estratos terciarios de areniscas de grano medio a fino con intercalaciones de arcilla. Aguas arriba de ésta falla geológica se presentan sedimentos aluviales de la época pleistocénica. Son gravas, arenas, limos y arcillas, semi-consolidadas que presentan afloraciones de costras de sal. Estos sedimentos han sido depositados en una cuenca casi cerrada, porque en esa época el río Pisco casi no tenía salida hacia el mar. Esto dió origen a la formación de lagunas que posteriormente se secaron dejando costras de sal.

En la parte alta de ésta cuenca, donde el río Pisco sale de las contrafuertes occidentales de los Andes existen depósitos de piedemontes muy gruesos. En ésta zona existe una irrigación (irrigación de Cabeza de Toro), donde se producen muchas pérdidas de agua hacia el subsuelo, debido a la textura muy gruesa del suelo.

La falla geológica antes mencionada se comporta como una barrera, que restringe el drenaje natural. Por ésta razón el nivel freático ha subido después del inicio del riego en el mencionado proyecto de irrigación. Actualmente existe una zona extensa donde el nivel freático está sobre o cerca de la superficie del suelo y se ha perdido muchos terrenos anteriormente cultivados.

2.2 El problema de drenaje en la agricultura

Cuando hay un problema de drenaje en el perfil del suelo se encuentra por lo general una tabla de agua a poca profundidad. Para determinar desde el punto de vista agrícola, si existe un problema de drenaje se ha tenido en cuenta los siguientes criterios:

- para un desarrollo normal, la mayoría de los cultivos requieren de una zona radicular más o menos profunda en donde el suelo retiene un volumen adecuado de agua para el consumo de la planta y que además tenga un buen grado de aeración. Bajo las condiciones de riego que se presentan en los valles de la costa peruana, los cultivos requieren una profundidad del nivel freático entre 0.8 y 1.5 m. Cultivos como la cebolla y camote, cuyo sistema radicular es poco profundo, requieren de una profundidad mínima de 0.8 m, mientras los frutales o la alfalfa requieren de una profundidad de 1.5 m. Hay que agregar que bajo un régimen de riego el nivel

freático oscila constantemente entre riegos alcanzando su máximo nivel inmediatamente después del riego para luego bajar gradualmente, hasta el próximo riego. La caña de azúcar tiene requerimientos especiales al momento de la maduración. El nivel freático durante el agoste deberá estar tan profundo que el aporte de agua a partir del nivel freático por ascenso capilar sea mínimo. En suelos de textura media sera recomendable en ésta época mantener el nivel freático a una profundidad de 1.8 m;

- el arroz es un cultivo especial. No requiere un nivel freático profundo, al contrario, es un cultivo que se desarrolla en un régimen de inundación controlada. Sin embargo, hay indicaciones que es necesario que una cierta cantidad de agua percola a través del perfil de suelo para el lavado de componentes tóxicos que son producto del estado anaeróbico;

- el peligro de salinización del perfil del suelo a partir del nivel freático. En un clima seco, el agua freática asciende por capilaridad a horizontes superiores donde se evapora el agua y las sales se acumulan. Este proceso es más marcado en la época de barbecho cuando no hay riego provocando un flujo de agua ascendente;

- en la época de riego las sales acumuladas en la capa superficial son lavadas hasta mayor profundidad, o son redistribuidas dentro del perfil del suelo, más no eliminadas del perfil. Entonces en el próximo barbecho el proceso de salinización se repite y así año tras año, cada vez con mayor rapidez. Cuando por alguna razón se deja de regar un campo durante dos o más años consecutivos, el suelo queda completamente salinizado e inutilizado para su futuro uso agrícola. Es un aspecto muy común que se puede observar en zonas con clima seco y nivel freático elevado; terrenos completamente salinizados y sin uso, junto con terrenos aún cultivados pero con rendimientos reducidos.

Para detener el proceso de salinización es necesario bajar el nivel freático; la profundidad requerida dependerá de las características físicas del suelo, principalmente capilaridad y salinidad del agua freática. A manera de orientación, esta profundidad generalmente es de 1.2 a 1.5 m, en suelos de textura gruesa y fina y de 1.8 m en suelos de textura media.

2.3 El problema de salinidad en la agricultura

Las sales, cuando se acumulan en el perfil del suelo, ejercen efectos sobre el desarrollo de las plantas. Se puede diferenciar tres efectos: osmóticos, tóxicos y nutricionales (RICHARDS, 1954; FAO/UNESCO, 1973; ALLISON, 1964).

- En condiciones normales cuando la concentración de sales en el suelo es baja, la solución del suelo tiene una presión osmótica baja. Al contrario, en suelos salinos la presión osmótica de la solución del suelo es elevada. La absorción de agua por las plantas esta regulada por la diferencia en presión osmótica entre las células vegetales de las raíces y la solución del suelo. Entonces, en suelos salinos donde la presión osmótica de la solución del suelo es elevada, la absorción de agua por las raíces es menor que en suelos normales.

- En lo que a toxicidad se refiere, tanto aniones como cationes podrían tener efectos específicos sobre el metabolismo de la planta, cuando se presentan en una concentración elevada. Sin embargo aun no se puede definir bien a que nivel de concentración un elemento es tóxico. El boro y el litio son tóxicos en concentración mínima, mientras que el sodio o el cloro pueden estar presentes en concentraciones mayores sin hacer daño a las plantas. Además existe marcada diferencia entre una especie de planta y otra con respecto a su tolerancia específica a un ión. Por otro lado es difícil diferenciar entre el efecto específico de los iones y el efecto de la concentración total de sales.

- En lo referente al efecto de las sales sobre la nutrición de las plantas, es muy variable. Existe cierta selectividad específica en la absorción de iones. Generalmente existe relación entre el efecto de las sales y el antagonismo entre dos o más iones; absorción de un ión está inhibido por la presencia del otro. Por ejemplo, altas concentraciones de sulfatos disminuyen la absorción de calcio y promueven la absorción del sodio.

En el caso de la Costa Peruana el problema de salinidad se debe a:

- un nivel freático elevado (Cap.3.2),
- insuficiente disponibilidad de agua de riego,
- mala calidad del agua de riego.

En el caso que la disponibilidad de agua de riego sea limitada, el agricultor riega sus cultivos en forma tal que humedecen el suelo hasta la profundidad de raíces únicamente. En consecuencia la pérdida de agua por percolación por debajo de la zona radicular es casi nula. En estas condiciones, al ser consumida, el agua por las plantas, quedan sales que se acumulan gradualmente en el suelo aumentando la salinidad hasta niveles tan altos que afectan a los cultivos en diferentes grados. Un efecto semejante tendría el uso de agua de mala calidad con fines de riego. La salinidad en el suelo se mantendrá a un nivel muy alto y aumentará aun más si el agua además de ser salina es escasa.

3. Evaluación del problema de drenaje y salinidad

3.1 Generalidades

En la evaluación del problema de drenaje y salinidad en los valles de la Costa Peruana se ha empleado información de diferente naturaleza. En la mayoría de los casos (34 valles), la evaluación se efectuó basándose en informaciones de la Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN) y con la colaboración de ésta Oficina.

En otros casos se ha obtenido la información básica de estudios específicos o de material aerofotográfico, o sea:

- Valle de Huaura (FAO, 1970)
- Valle Bajo y Medio Piura (CENDRET, 1968; IECO, 1968)
- Valles de Jequetepeque y Zaña (MINISTERIO DE AGRICULTURA, 1971)
- Valles de Tumbes, Chira, Chancay-La Leche, fotointerpretación controlada (SUDRET, 1974)

3.2 Criterios de evaluación

Por haberse utilizado diferentes fuentes base para la evaluación del problema de drenaje y salinidad, diferente ha sido el criterio de clasificación y evaluación del mismo.

3.2.1 Drenaje

En los estudios de ONERN (MASSON, 1973), las condiciones de drenaje fueron evaluados de acuerdo a los criterios establecidos en el "Manual de Levantamiento de Suelos".

En el SUDRET el problema de drenaje se ha clasificado en función de la profundidad del nivel freático tomando en cuenta los criterios expuestos en Cap.2.2.

La clasificación del problema de drenaje se muestra en el Cuadro 2. En la clasificación del problema de drenaje adoptado por SUDRET, el drenaje es bueno, si el nivel freático está a una profundidad mayor de 1.5 a 2.0 m, en suelos ligeros y pesados respectivamente, considerándose ésta profundidad en la época seca o sea durante el barbecho. Cuando el nivel freático en ésta época se mantiene a menor profundidad, la acumulación de sales en el perfil del suelo por efecto del ascenso capilar podría ser peligroso. Asimismo, si en la época de barbecho el nivel freático se mantiene a una profundidad menor a la antes indicada, menor aún será en la época de riego, pudiendo llegar a los grados imperfecto, pobre o muy pobre.

En el caso de drenaje imperfecto, el desarrollo de los cultivos es casi normal; se puede observar algunas manchas donde las plantas sufren por exceso de humedad y/o salinidad. Sin embargo cuando se trata de una zona en que predomina el cultivo de arroz, fácilmente se subestima la gravedad del problema. Con un drenaje pobre, los terrenos normalmente son cultivados, pero se puede observar que los cultivos son seriamente afectados por el exceso de humedad y/o salinidad.

CUADRO 2: CLASIFICACION DEL PROBLEMA DE DRENAJE

Grado	Profundidad del nivel freático en la época de barbecho (m)	
	ONERN	SUDRET
Drenaje bueno	más de 1.8	más de 1.5 a 2.0
Drenaje moderado	1.3 a 1.8	
Drenaje imperfecto	0.75 a 1.3	0.8 a 1.5 (D ₁)
Drenaje pobre	0.3 a 0.75	0.3 a 0.8 (D ₂)
Drenaje muy pobre	menos de 0.3	menos de 0.3 (D ₃)

En el caso de drenaje muy pobre, los suelos normalmente no son cultivados, sino crece una vegetación natural espontánea de grama salada o totora.

3.2.2 Salinidad

En el establecimiento de la clasificación de la salinidad de los suelos, ONERN ha diferenciado suelos con salinidad "incipiente" y suelos con salinidad "evidente". Según MASSON (1973) los primeros "son aquellos suelos que no manifiestan síntomas visibles de presencia de sales. En muchos de ellos, los cultivos se desarrollan sin problemas aparentes, encontrándose la salinidad disimulada ante la vista edafológica, demostrando sin embargo su condición salina, cuando se analiza en el laboratorio." Estos suelos generalmente no presentan problemas de drenaje y su salinidad rara vez llega a ser mayor que 15 mmhos/cm. Aparentemente en los suelos con salinidad incipiente se encuentran algunas manchas salinas, salinidad que se debe al mal manejo de agua de riego o uso de agua de mala calidad.

Dentro de la evaluación de los problemas de drenaje y salinidad, los suelos de salinidad incipiente no se han considerado como problemáticos. Según el mismo autor "los suelos de salinidad evidente son aquellos que demuestran claramente la presencia de sales, ya sea bajo la forma de afloración de costras o manchas salinas. Por lo general estos suelos conllevan problemas de drenaje y su salinidad es variable llegando a niveles excesivos". Los diferentes niveles de la salinidad de los suelos según ONERN se muestra en el Cuadro 3.

CUADRO 3: CLASIFICACION DE LA SALINIDAD DE LOS SUELOS SEGUN ONERN

Grado	CE del extracto de saturación (mmhos/cm a 25 °C)
Baja	0 - 4
Ligera	4 - 8
Moderada	8 - 15
Fuerte	15 - 30
Muy fuerte	30 - 50
Excesiva	más de 50

El SUDRET para la evaluación de los problemas de salinidad ha adoptado como criterio la cuantificación del grado de salinidad según el estado de los cultivos, teniendo en consideración que la salinidad en el suelo no es una causa sino el resultado de uno o más de los siguientes problemas; mal drenaje, riego con agua salina, escasa disponibilidad de agua de riego y además porque dentro de una zona el grado de salinidad es muy variable. Entonces no es muy importante una cantidad específica de sales en una muestra de suelo, sino el efecto que produce sobre los rendimientos de los cultivos en combinación con uno o más de los factores antes mencionados.

3.2.3 Otros criterios

En el estudio de la evaluación de los problemas de drenaje y salinidad en los valles de la Costa Peruana, además de la clasificación de los problemas de drenaje y salinidad, se han tomado en cuenta otros factores. Ellos han permitido llegar a conclusiones preliminares sobre el estado de afectación de los suelos y sobre posibles alternativas de solución. Estos factores han sido:

- la evaluación de las posibilidades para evacuar los excesos de agua de drenaje de las zonas afectadas hacia el río o el mar. Básicamente se tuvo en cuenta la topografía, el desnivel absoluto entre el río o mar y la zona afectada, la distancia entre ambas y la extensión de la zona afectada. Por la falta de planos topográficos con suficiente exactitud, (los planos existentes tienen curvas de nivel cada 5 a 10 m) no fué posible cuantificar muy detalladamente éstos criterios,

- la aptitud de riego del suelo después de su mejoramiento mediante drenaje y levado. Existen suelos que tendrían buenas características físicas (retención de humedad, aeración) pero cuya drenabilidad es dudosa en el sentido que requiere una inversión elevada en obras de drenaje. Lo contrario se presenta en suelos arenosos (playas elevadas) cuyas características físicas son marginales pero que fácilmente podrían ser recuperados,

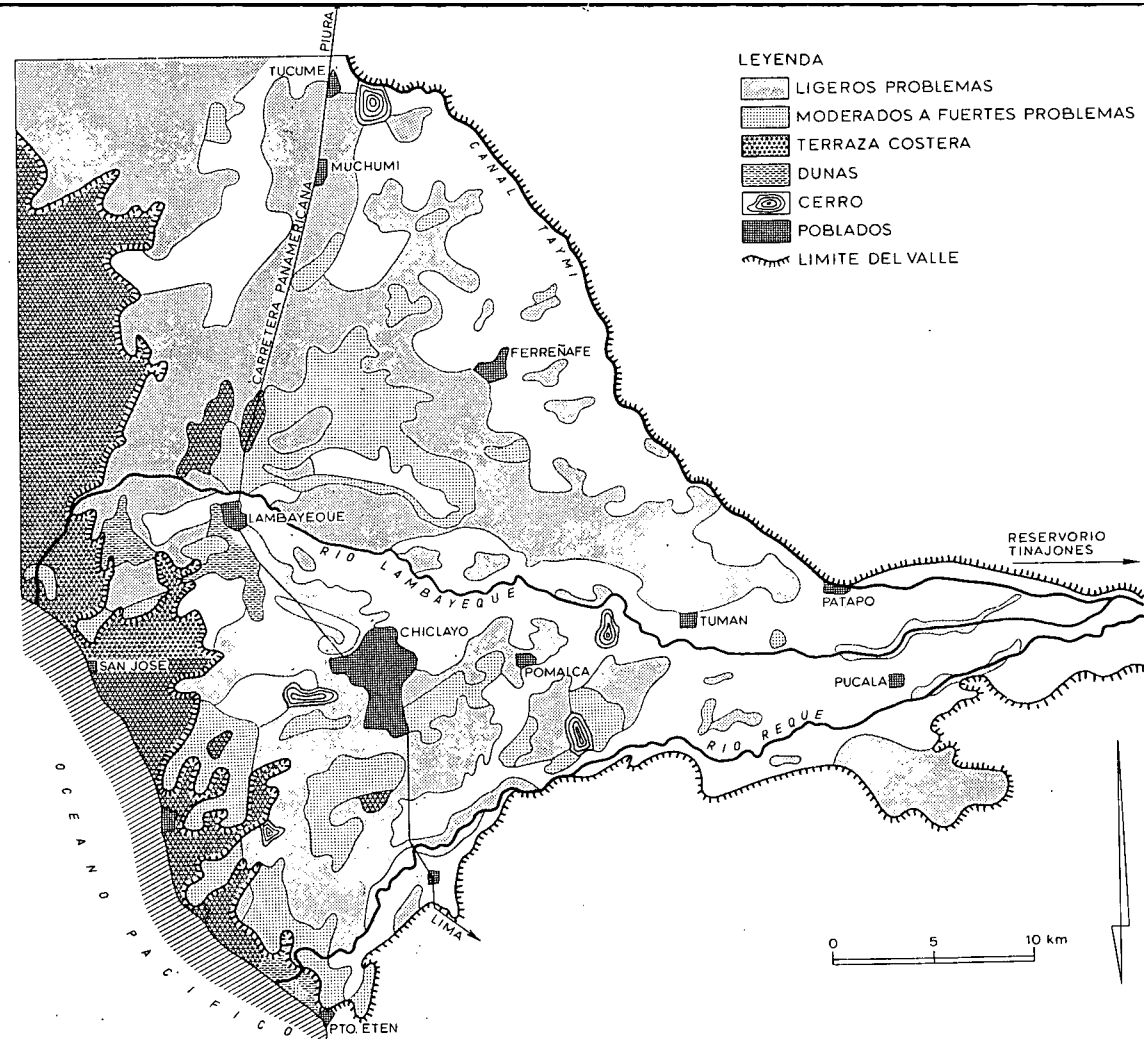
- la disponibilidad de agua de riego. La recuperación de suelos afectados por problemas de mal drenaje y salinidad requiere agua tanto para fines de lavaje como para el posterior uso agrícola. Además, después de la recuperación, una dotación de agua extra sobre el consumo de la planta es requerida para mantener un buen balance de sales. En varios valles de la Costa Peruana la disponibilidad del agua es tan limitada que no se puede incorporar tierras nuevas ni aumentar la dotación de agua con fines de lavaje,

- las características hidrodinámicas del substratum. Un substratum profundo y permeable permite un espaciamiento entre drenes grande, por consiguiente se requiere menor inversión en obras de drenaje. Por el contrario cuando existe un estrato impermeable a poca profundidad o el substratum es poco permeable, el espaciamiento entre drenes es menor y la inversión requerida mayor,

- el grado del problema. Existen zonas afectadas por problemas de drenaje donde la recarga de agua subterránea es elevada. Esto tiene como consecuencia un espaciamiento entre drenes más cortos y una inversión aún mayor. El suelo, puede tener características adversas para la desalinización como son lentitud de lavado, sodicidad y peor aun si requiere aplicación de enmiendas químicas, aumentando de ese modo el costo de recuperación,

- problemas de inundación y/o erosión. En las terrazas bajas cercanas al río, frecuentemente existen problemas de drenaje y salinidad. La instalación de un sistema de drenaje en éstas zonas no se recomienda mientras no se ejecute obras de defensas ribereñas o el encauzamiento de los ríos, y

- la necesidad social-económica de tierras de la zona. En los valles del sur del Perú la necesidad de tierras agrícolas es mucho mayor que en el norte; por ésta razón se valorizan más alto. Esto hace necesario diferenciar el criterio económico de justificación de su recuperación.



Plano 1. Problemas de drenaje y salinidad. Valle de Chancay-La Leche.

4. Magnitud del problema de drenaje y salinidad en la Costa Peruana

La evaluación de los problemas de drenaje y salinidad se realizó en 42 de los 52 valles de la Costa Peruana, cubriendo una superficie de 757,000 ha. Se encontró que 501,780 ha (66.5%) no presentan problemas relacionados con acumulación de sales o drenaje. El resto o sea 255,230 ha (34%), si presentan problemas de drenaje y salinidad en diverso grado. Es notable la similitud de esta cifra con la estimación hecha por STUART (1963) quien indicó 30% de suelos afectados. En el Cuadro 4 se resume el problema a nivel costa diferenciado en grados de afectación. En el Cuadro 5 se detalla los problemas por valle.

CUADRO 4: AREA AFECTADA CON PROBLEMAS DE DRENAJE Y SALINIDAD EN LA COSTA PERUANA

Grado del problema	Extensión (ha)	%
Sin problemas	501,780	66.5
Ligeros problemas de drenaje y/o salinidad	102,360	13.5
Moderados a fuertes problemas de salinidad	19,385	2.5
Moderados a fuertes problemas de salinidad y drenaje	133,485 ¹	17.5

¹ Incluye 27,257 ha con problemas de drenaje y/o salinidad no especificados

Normalmente de arriba hacia abajo en los valles, los problemas de drenaje y salinidad se agravan, sin embargo existen casos contrarios.

Como primer ejemplo tenemos el valle de Chancay-La Leche (Plano 1). En la parte central de este valle la caña de azúcar es el cultivo principal. Con excepción de la parte alta en el resto de la zona azucarera existen campos abandonados por salinidad. El nivel freático en la zona muchas veces está a una profundidad menos de 2.0 m, indicación que el drenaje natural es restringido.

Más aguas abajo éstos problemas se incrementan hasta llegar a ser muy graves en la parte más baja del valle, al oeste de la carretera panamericana. En ésta zona el cultivo predominante es arroz, cultivo cuya tolerancia a la salinidad y nivel freático alto permite obtener cosechas de subsistencia.

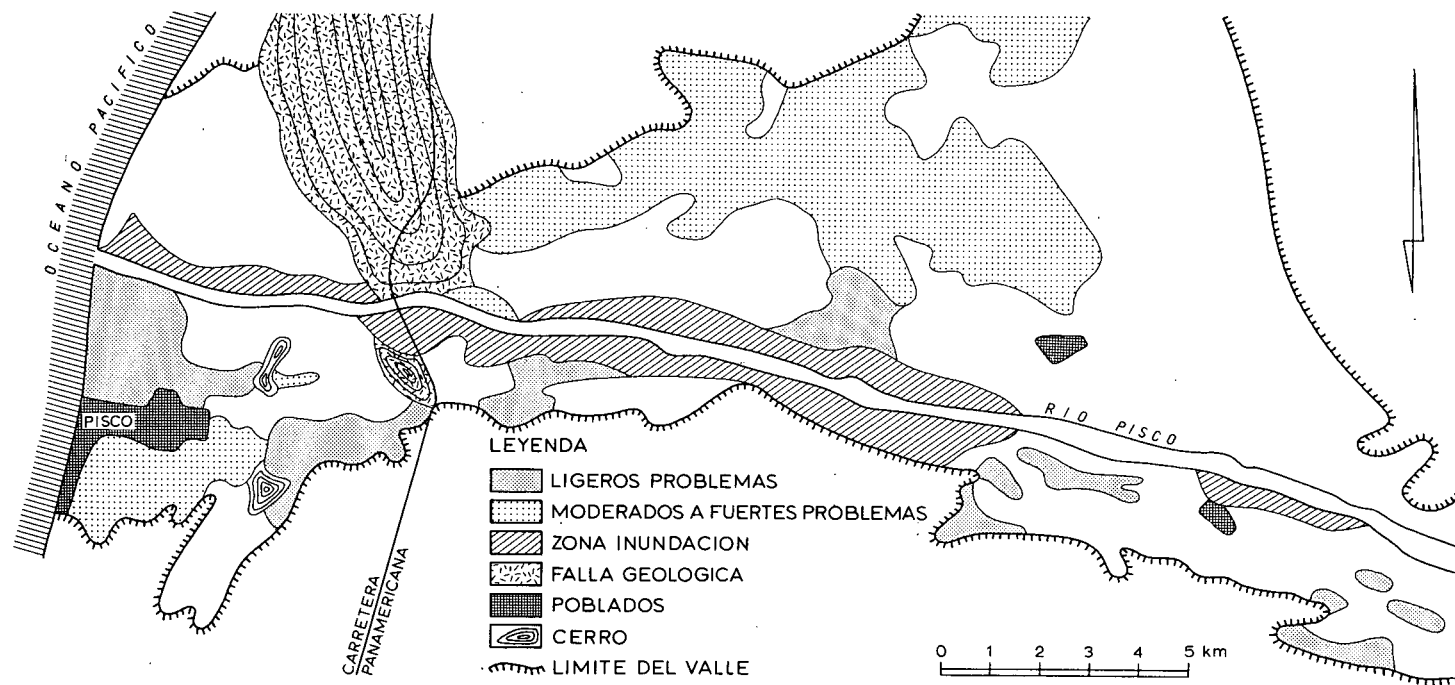
Al norte del río Lambayeque se extiende una zona formada por sedimentos pertenecientes al Pleistoceno, morfológicamente no correspondientes al valle actual del río Chancay. Estos sedimentos son poco permeables y su profundidad varía entre 3 y 6 m, en la parte alta hasta superficial en la parte media y baja. La textura de la parte alta varía entre gruesa y media y el cultivo predominante

es arroz. Esto causa fuerte recarga al acuífero, afectando principalmente la parte media y baja del área, donde hasta antes de la ejecución de los drenes troncales (1963-1966) existían lagunas (BARANDIARAN, 1960). Aun hoy en día existen muchos problemas de salinidad y drenaje por resolver.

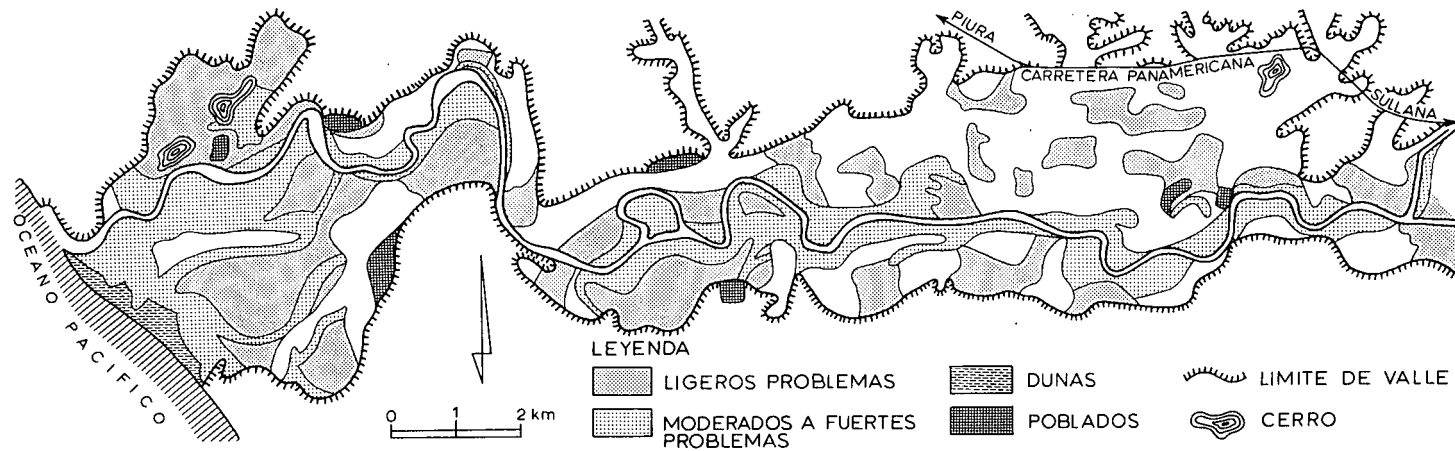
Por otro lado al noroeste del valle Chancay-La Leche, cerca de los pueblos de Mochumí y Tucume, a gran parte del área está salinizada por la falta de agua para un riego adecuado, estimándose que 40% del área no se cultiva y el resto se dedica principalmente a cultivos que requieren poca agua (garbanzo y maíz). Sin embargo, aún bajo estas condiciones el nivel freático se mantiene a menos de 2 m de profundidad en la época seca. Esta es una indicación del pobre drenaje de la zona y permite suponer lo que ocurriría si se incrementa el riego en la zona. Una primera experiencia en este sentido se refiere a la elevación del nivel freático después de la ampliación del riego cuando entró en funcionamiento el reservorio Tinajones (comunicación personal).

Otro ejemplo sobre zonificación de los problemas de drenaje y salinidad tenemos en el valle de Pisco (Plano 2). En la parte alta y derecha del río se ha desarrollado una irrigación sobre depósitos de piedemonte de textura gruesa. Las pérdidas de agua de riego en esta zona son muy altas, ocasionando moderados o fuertes problemas de drenaje y salinidad en una gran área de la parte media del valle, donde existe una falla geológica (Cap.2.1.3) que limita fuertemente el drenaje del área.

Una situación distinta sobre zonificación de los problemas de drenaje y salinización, se puede observar en el valle del Chira (Plano 3). En este valle los problemas están relacionados principalmente con la fisiografía. Los más fuertes problemas de drenaje se encuentran cerca a la desembocadura al mar y en algunas depresiones (antiguos cauces del río). Asimismo problemas moderados o ligeros se hallan en las terrazas bajas ribereñas.



Plano 2. Problemas de drenaje y salinidad. Valle de Pisco.



Plano 3. Problemas de drenaje y salinidad. Valle de Chira.

5. Posibilidades de recuperación

En el estudio de los problemas de salinidad y drenaje de los valles de la Costa Peruana, no solamente se evaluó el grado de tales problemas, sino que también se consideró en forma preliminar la posibilidad de recuperar las áreas afectadas. Para ello se tuvo en consideración la serie de factores mencionados en el Cap.3.2.3. Es así cómo se ha llegado a la conclusión resumida en el Cuadro 4: de la superficie afectada en la Costa, 102,360 ha, presentan problemas ligeros de drenaje y/o salinidad.

Parte de los problemas ligeros se encuentran en áreas cultivadas con arroz, generalmente con drenaje moderado, que causan un nivel freático elevado. Por consiguiente si se elimina el cultivo de arroz en éstas áreas es de esperarse una disminución o eliminación del problema de drenaje. Como ejemplo consideremos el caso de los valles Jequetepeque y Camaná, si en ellos se limitará el cultivo de arroz a las zonas con suelos de textura fina, el problema disminuirá notablemente. Sin embargo para muchas zonas con problemas de salinidad y drenaje el arroz es un cultivo que se adapta excelentemente. Por ejemplo en el valle Tumbes con extensas áreas con el nivel freático elevado aun en la época seca y suelo significativamente salino, los rendimientos de arroz son satisfactorios, debido al clima y abundante agua de riego de buena calidad. La eliminación del cultivo de arroz en el valle de Tumbes, contrariamente a lo que ocurrirá en Jequetepeque y Camaná, no disminuiría los problemas de drenaje aunque si aumentaría los problemas de salinidad. Esto se debe al relieve topográfico plano y poca altura con respecto al nivel del mar.

En otras zonas el problema de drenaje actual es ligero porque no se está regando intensivamente todo el área, por ejemplo si en el sector noroeste del valle Chancay-La Leche se incrementara el área irrigada, se incrementaría el área con problemas de drenaje. Otros casos con problemas ligeros no han sido claramente establecidos porque existen otros factores de tipo climatológico, edafológico y tecnológico, más influentes en la producción.

En conclusión la mayoría de las zonas con problemas ligeros de salinidad y drenaje no urgen de medidas correctivas excepto en aquellos lugares donde se piensa ampliar el área irrigada, por ejemplo donde se están desarrollando proyectos integrales de riego tipo Chira-Piura, Chancay-La Leche, etc.

Los problemas moderados o fuertes de salinidad más no de drenaje se encuentran en una superficie total de 19,385 ha. Teóricamente éstas áreas pueden ser fácilmente recuperadas ya que sólo se requiere incrementar la dotación de agua de riego

Sin embargo en la mayoría de los valles de la Costa Peruana donde se ha encontrado éste tipo de problemas, la disponibilidad de agua es muy limitada o de mala calidad. Se ha estimado que únicamente 7,000 ha con éste grado y tipo de problema se podría recuperar.

Las zonas con problemas moderados o fuertes de salinidad y drenaje cubren una extensión total de 133,485 ha. Sin embargo no toda ésta área sería recuperable. Teniendo en cuenta los factores mencionados en el Cap.3.2.3, se llegó a la conclusión que 90,306 ha serían recuperables con obras de drenaje y lavado de suelos. Para mayor seguridad es necesario estudiar estas áreas más detalladamente. El área restante o sea 43,179 ha es considerada técnica y económicamente difícil o no recuperable.

En el Cuadro 5 se resume para cada valle el área total afectada, el área que requiere únicamente lavado y mejoramiento del riego (suelos salinos), al área con moderados a fuertes problemas de drenaje y salinidad con posibilidades de ser recuperados igualmente aquellos difícilmente recuperables. Asimismo se indica brevemente los principales factores limitantes.

Es importante hacer notar que únicamente entre los valles Chira, Piura y Chancay-La Leche existen más de 40,000 ha de terrenos con moderados a fuertes problemas de drenaje y salinidad que podrían recuperarse mediante obras de drenaje. Estos tres valles están ubicados al norte del Perú y en ellos se está desarrollando proyectos integrales incluyendo obras de drenaje a nivel de valle, dejando el drenaje parcelario para la fase de desarrollo agrícola.

Otros 6 valles donde a mediano plazo es probable el inicio de obras de drenaje son: Mala, Cañete, Pisco, Camaná, Majes y Tambo. Son valles ubicados al sur del Perú y la superficie total por recuperar es del orden de 14,000 ha.

CUADRO 5: AREA AFECTADA[†] CON PROBLEMAS DE DRENAJE Y SALINIDAD EN CADA UNO DE LOS VALLES DE LA COSTA PERUANA (ha)

Valle	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tumbes	12,226	8,540	1,339		7,201		4,250	2,951	evacuación, manglares
Chira	33,344	16,842	9,017	189	7,636	189	2,500	5,136	encauzamiento del río
Piura	64,700	35,400	15,000		20,400		20,000	400	
San Lorenzo	30,000	2,500	500		2,000		2,000		
Chancay-La Leche	106,299	51,749	26,911	166	24,672	116	20,000	4,672	suelos, evacuación
Jequetepeque	46,996	23,477	19,701	526	3,250	526	2,863	387	zonas aisladas, evacuación
Zaña	39,781	7,479	3,686	1,152	2,641	1,152	2,112	529	suelos, escasez de agua
Chicama	61,790	21,352	N.D.	N.D.	N.D.		9,836	11,516	escasez de agua, evacuación, suelos
Moche	13,040	419	N.D.	N.D.	N.D.		309	110	zona arqueológica
Virú	12,181	2,850	2,460		390			390	escasez de agua, evacuación
Chao	10,313	5,245	1,960	3,285					escasez de agua
Santa-Lacramarca	17,447	2,228	461		1,767		702	1,065	urbanización, evacuación
Nepeña	12,179	4,947	3,162		1,785		1,491	294	evacuación, escasez de agua
Casma	15,173	4,306	2,732		1,574		1,000	574	evacuación, escasez de agua
Huarmey	2,839	1,055	645		410		210	200	escasez de agua, evacuación
Culebras	1,735	380	380						escasez de agua
Fortaleza, Supe y Pativilca	24,260	4,007	N.D.	N.D.	N.D.		1,681	2,326	evacuación, suelos, escasez de agua en Supe
Huaura	37,360	6,170	3,790		2,380		1,940	440	evacuación
Chancay-Huaral	22,600	3,736	1,970		1,766		1,721	45	evacuación, suelos
Mala	8,000	1,479	1,359		120		1,359	12	evacuación, suelos
Cañete	24,050	4,590	816		3,774		3,139	635	evacuación, inundación
Chincha	22,600	2,260		800	1,460		520	940	escasez de agua
Pisco	25,585	10,997		3,246	7,751	3,246	3,123	4,628	evacuación, suelos
Ica	32,680	2,570	1,195	1,000	375	1,000	250	125	evacuación, escasez de agua

(Cuadro 5 cont.)

Valle	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Río Grande	23,876	180		114	66	114		66	escasez de agua, evacuación
Acarí	5,042	964			964		703	261	zonas aisladas, erosión
Yauca	1,536	968	210	706	52		52		escasez de agua
Chaparra	1,062	110		110					escasez de agua
Atíco	140	6		6					escasez de agua
Ocoña	782	389	370		19			19	evacuación, suelos
Majes	6,289	3,018		305	2,713	305	2,713		evacuación podría ser problemática
Camana	6,003	4,347	2,027	13	2,307	13	1,400	907	evacuación, erosión
Sihuas	2,633	512	277		235	277	135	100	evacuación
Vitor	5,562	1,130	251		879	251	529	350	zonas aisladas, erosión
Tambo	10,200	4,711			4,711		2,557	2,154	evacuación, erosión, suelos
Moquegua	2,589	289		244	45	244		45	evacuación, erosión
Locumba	3,210	3,179		1,626	1,553		184	1,369	escasez de agua, agua de riego muy salina, evacuación
Sama	2,896	2,896		1,144	1,452		1,027	425	escasez de agua, erosión
Caplina-La Yarada	7,953	7,953	3,500	4,453					escasez de agua

1 superficie estudiada, aproximadamente el área regable

2 área total afectada con problemas de drenaje y/o salinidad en diferentes grados

3 área afectada con ligeros problemas de drenaje y/o salinidad

4 área afectada con moderados a fuertes problemas de salinidad

5 área afectada con moderados a fuertes problemas de drenaje y salinidad

6 área recuperable mediante lavado

7 área probablemente recuperable, requiere estudios más detallados

8 área difícilmente o no recuperable

9 factores principales que hacen difícil una recuperación

+ Fué distinto el material base sobre lo cual ha sido determinado la superficie del área afectada en cada valle

Bibliografía

ALLISON, L.E. (1964): Salinity in relation to irrigation. *Advances in Agronomy* 16:139-179.

BARANDIARAN, C. (1960): Proyecto de drenaje Valle Río Chancay en Lambayeque. Min.de Fomento y Obras Públicas.

BELLIDO, E. (1969): Sinopsis de la geología del Perú. Bol.22 del Servicio de Geología y Minería. Min.de Energía y Minas.

CENDRET (1968): Estudio de las Características hidrodinámicas de los suelos. Valles:Bajo y Media Piura.

CORNEJO, A. (1971): El riego en el Perú. Inf.Técnico 26. Cendret, Direcc. Gen.de Aguas e Irrigación, Perú.

FAO (1970): Reconocimiento sobre el uso de aguas y tierras para el desarrollo de la cuenca del río Huaura. Inf.FAO/SF:88/PER 23.

FAO/UNESCO (1973): Irrigation, Drainage and Salinity. An international source book.

GILBOA, Y. (1971): Replenishment sources of the alluvial aquifers of the peruvian coast. *Well Association* Vol.9: 39-46.

IECO (1968): Rehabilitación del Valle Bajo Piura. Estudio de factibilidad.

MASSON, L.(1973): Evaluación de la salinidad en el Perú. Contribución al grupo de trabajo para "La evaluación y control de degradación de tierras en América Latina". Proyecto regional FAO/PNUD RLA 70/457 Publicado en Bol.Latino-americano sobre fomento de tierras y aguas no.6.

MIN.DE AGRICULTURA (1971): Estudio semidetallado de suelos Proyecto Jequetepeque-Zaña.

MIN.DE AGRICULTURA (1971): Memoria 1971 de la Zona Agraria II.

ONERN (1969-1974): Inventario, evaluación y uso racional de los recursos naturales de la costa. Cuenca del río Chancay-Huaral (1969); Cuenca del río Cañete (1969); Cuenca de los ríos San Juan (Chincha y Topara, 1970); Cuenca del río Pisco (1971); Cuenca del río Ica (1971); Cuenca del río Grande (1971); Cuencas de los ríos Santa, Lacramarca y Nepeña (1972); Cuencas de los ríos Fortaleza, Pativilca y Supe (1972); Cuenca del río Chicama (1973); Cuencas de los

ríos Moche, Virú u Chao (1974); Cuencas de los ríos Acarí, Yauca, Indio Muerto y Chaparra (en publicación); Cuencas de los ríos Atíco, Caravelí, Pescadores y Ocoña (en publicación); Cuencas de los ríos Majes, Camaná (1974); Cuencas de los ríos Quilca y Tambo (en publicación); Cuencas de los ríos Osmore, Locumba, Sama y Caplina (en publicación).

PETERSEN, G. (1956): Hidrogeología del río Chancay-Lambayeque. Bol.Soc. Geol.Perú.

RICHARDS, L.A. (Ed. 1954): Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. Traducido en español. Agric.Handbook 60, USDA.

SALZGITTER INDUSTRIEBAU GmbH (1963): Geología e Hidrología de la zona de Irrigación de Chiclayo, Lambayeque-Valle Nuevo. Tomo A: Memoria Descriptiva Proyecto Tinajones. Min.de Fomento y Obras Públicas, Perú.

STUARD, F.J. (1963): Recuperación por drenaje de los suelos salinos en el Perú. Min.de Agricultura, Oficina de Planeamiento, Perú.

SUDRET (1974): Evaluación de los problemas de Drenaje y Salinidad en el valle de Chancay-La Leche, Lambayeque (en preparación). Evaluación de los problemas de Drenaje y Salinidad en los valles de Chira y Tumbes (en preparación). Direcc.Gen.de Aguas, Perú.

II. EXPERIMENTOS DE RECUPERACION DE SUELOS SALINO-SODICOS

Area Piloto de Drenaje Chacupe

Contenido

1	INTRODUCCION	43
2	EL VALLE DEL RIO CHANCAY-LAMBAYEQUE	44
2.1	Generalidades	44
2.2	Aspectos geológicos	45
2.3	Aspectos agrológicos	47
2.4	Drenaje y salinidad	48
3	EL AREA PILOTO DE DRENAJE CHACUPE	49
3.1	Generalidades	49
3.2	El perfil del suelo	49
3.3	Las características físicas del suelo	49
3.4	Características químicas del suelo	51
3.5	Características mineralógicas	52
4	DESARROLLO FISICO DEL AREA PILOTO DE DRENAJE	53
4.1	Generalidades	53
4.2	Las actividades realizadas	53
4.2.1	Instalación del sistema de drenaje	53
4.2.2	Instalación del sistema de desagüe	53
4.2.3	Instalación del sistema de riego	53
4.2.4	Preparación del terreno	55
5	LAVADO Y CAMPANAS AGRICOLAS	56
5.1	Lavado	56
5.2	Campañas de arroz	56
5.3	Campañas de invierno	57
5.4	Investigaciones y muestreos	57
5.4.1	Líneas de investigación	57
5.4.2	Muestreo de suelos	57
5.4.3	Recolección de datos hidrométricos	58
6	EVALUACION DEL SISTEMA DE DRENAJE	59
6.1	Generalidades	59
6.2	Fluctuación del nivel freático	60
6.3	El efecto del dren colector	60
6.4	El comportamiento de los tubos y de los materiales filtroprotectores	62
6.4.1	Paja de lino	67
6.4.2	Paja de arroz	68
6.4.3	Lana de vidrio	68
6.4.4	Grava	69
7	DESALINIZACION Y DESODIFICACION	71
7.1	Generalidades	71
7.2	El balance de agua	72
7.2.1	El balance de agua de la campaña de arroz 1971-1972	72
7.2.2	El balance de agua en el barbecho de 1972	75
7.2.3	Percolación e infiltración	76
7.2.4	Resumen del balance de agua del experimento	77

7.3	Desalinización	78
7.4	Desodificación	82
7.5	Aplicación de enmiendas químicas	85
7.6	Desarrollo de las características físicas del suelo	86
7.7	Comentario final sobre la recuperación	87
8	ALGUNOS DATOS SOBRE LOS COSTOS DE RECUPERACION	90
8.1	Generalidades	90
8.2	Costos del sistema de drenaje	90
8.3	Costos del proceso de lavado y aplicación de enmiendas químicas	91
9	CARACTERISTICAS HIDRODINAMICAS DEL SUBSUELO. MEDICION Y EVALUACION	93
9.1	Generalidades	93
9.2	La capa impermeable	93
9.3	La conductividad hidráulica	94
9.3.1	A partir de mediciones de campo	94
9.3.2	A partir de una evaluación del sistema de drenaje	97
9.3.3	Comentario final	100
10	RESUMEN Y RECOMENDACIONES	101
10.1	Resumen	101
10.2	Recomendaciones	103
ANEXO 1	ANALISIS QUIMICOS Y FISICOS	104
1.1	Análisis químicos	104
1.2	Análisis físicos	105
ANEXO 2	PERFIL TIPICO DEL SUELO EN EL AREA PILOTO CHACUPE	107
ANEXO 3	CONCEPTOS EN DRENAJE DE TIERRAS AGRICOLAS	108
RELACION DE SIMBOLOS		113
BIBLIOGRAFIA		114

1. Introducción

El valle del río Chancay-Lambayeque es uno de los principales valles bajo riego en la Costa Peruana. La economía en este valle depende básicamente de la agricultura. El área bajo riego es aproximadamente 70,000 ha. Los principales cultivos son: la caña de azúcar en la parte media del valle, el arroz en la parte norte y nor-este y en el resto predominan los cultivos de alfalfa y hortalizas.

Actualmente se está ejecutando un proyecto integral de desarrollo agrícola en el valle que incluye la regulación del sistema de riego, obras de drenaje e incorporación de nuevas tierras para uso agrícola. La realización de estas obras corresponde a la Dirección Ejecutiva del Proyecto Tinajones (DEPTI).

Los problemas de salinidad y mal drenaje en este valle son considerables: el 25% del área cultivada está afectada en menor o mayor grado.

Dos factores hicieron necesario la instalación de un Área Piloto de Drenaje y Salinidad:

- el valle del río Chancay-Lambayeque es muy importante para el agro peruano,
- los problemas de drenaje y salinidad en este valle son graves.

La meta de tal área piloto debiera ser: establecer normas, métodos y costos de drenaje que sirvan posteriormente para desplegar un plan de recuperación de tierras degradadas por mal drenaje y salinidad a nivel del valle.

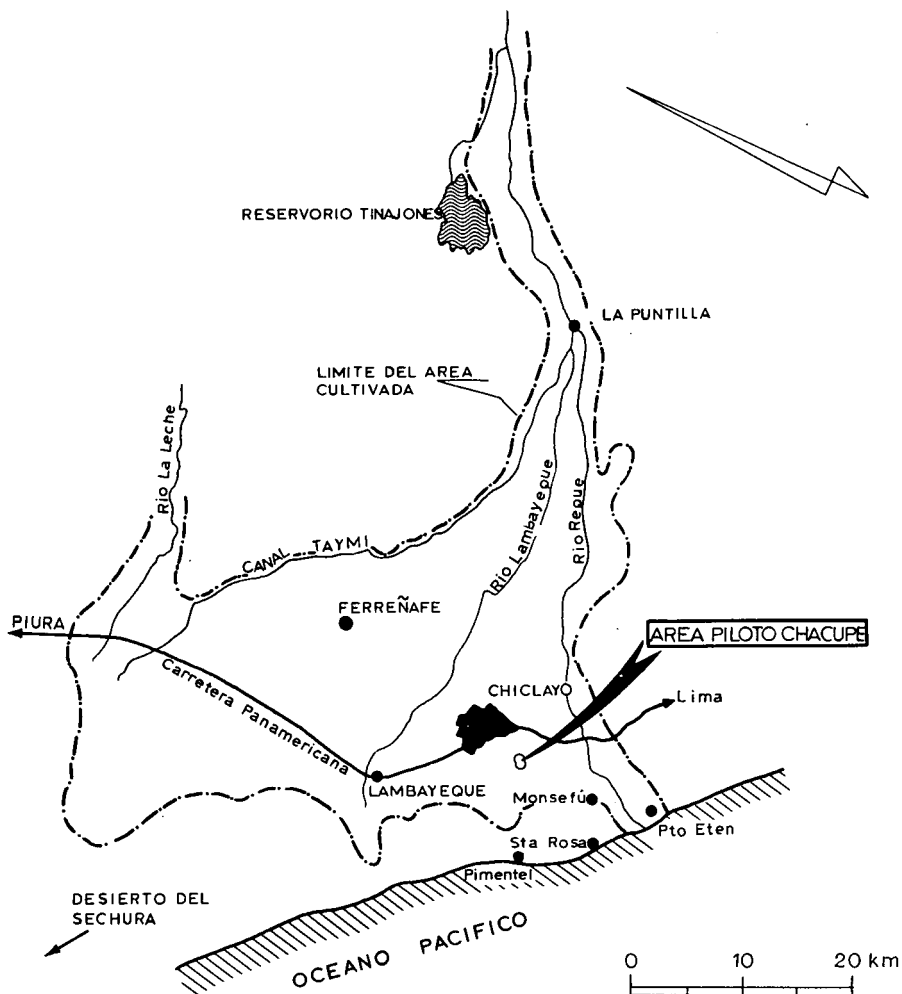
Después de un estudio de reconocimiento realizado a fines de 1969, se seleccionó un lote en la zona de Chacupe, ubicado en la parte baja del valle, cerca de la ciudad de Chiclayo. En este lote se instaló el área piloto de drenaje. Después de una etapa breve de lavado de suelos, se inició la campaña agrícola con el cultivo de arroz en el año de 1971, habiéndose efectuado hasta la fecha 3 campañas.

Si bien los suelos del área piloto, que inicialmente estaban salinizados en forma excesiva, aún no se han recuperado por completo, la presente publicación tiene por objeto exponer los resultados obtenidos y las dificultades encontradas.

2. El valle del río Chancay-Lambayeque

2.1 Generalidades

El valle del río Chancay-La Leche se encuentra en el Departamento de Lambayeque, aproximadamente a 760 km al norte de Lima. A lo largo del Pacífico tiene una longitud de unos 46 km y en la dirección OSO-ENE tiene un ancho que varía entre 20 a 36 km (ver Plano 1).



Plano 1. Valle Chancay-La Leche.

El río Chancay nace en algunas pequeñas lagunas a una altura de aproximadamente 4,000 m.s.n.m. y tiene una longitud de 180 km hasta su desembocadura en el Océano Pacífico. Tiene agua durante todo el año, con una descarga promedio anual de 22 millones de m³, descarga que se produce mayormente durante los meses de Enero hasta Abril.

Se puede diferenciar cuatro sectores a lo largo del río: los sectores de la serranía, el desfiladero, las llanuras y el cono de deyección. Este último es el sector más importante para la agricultura. Su superficie abarca unas 151,600 ha (PETERSEN, 1956).

El cono de deyección se extiende de la Puntilla al Pacífico y tiene una longitud desde su ápice hacia su base en el mar de unos 50 km. La pendiente es muy suave, en promedio de 0.2% aunque en algunas partes la superficie es casi horizontal o depresionada dando origen a áreas pantanosas. En la Puntilla, el río se bifurca en 2 ramales siendo el río Reque, lo que discurre por la parte sur del cono de deyección y el río Lambayeque, lo que discurre por el centro.

El clima de la zona como en toda la Costa Peruana es seco y templado. La temperatura media diaria mensual es de 20 °C, la precipitación es menor que 50 mm y ocurre en los meses de Enero, Febrero y Marzo.

2.2 Aspectos geológicos

La historia geológica del valle es todavía poco conocida. El cono de deyección, que en su parte central abarca un espesor superior a 200 m (SALZGITTER, 1963), está compuesto de estratos de sedimentos Plio-Pleistocénicos con una manta superficial del Holoceno. Los estratos buzan suavemente hacia el Pacífico con un declive algo superior al terreno. El origen de los sedimentos es mayormente fluvial, entre los que también hay sedimentos de menor importancia de origen lacustre o marino.

Al final del Pleistoceno hubo una emersión epirogénica regional (SALZGITTER, 1963) dando origen a una erosión en la parte central del cono de deyección. Esta erosión, además de ser causada por la emersión epirogénica, ha sido influenciada por la regresión del mar en el último glacial del Pleistoceno. Una probable nueva emersión epirogénica local ha recortado el amplio valle, formando una especie de terraza costera, a través de la cual el río Chancay ha formado dos desembocaduras: una entre los pueblos de Monsefú y Puerto Etén y la otra al Oeste de la ciudad de Lambayeque (ver Plano 1).

En el Holoceno sedimentos fluviales entre-mezclados con arenas eólicas han sido depositados en toda la parte central del cono de deyección. Cerca las desembocaduras del río Reque y del río Lambayeque, se han formado extensos zonas de dunas actualmente estables en su mayoría.

En el sector del cono de deyección se puede diferenciar varias zonas con una marcada diferencia en sedimentos:

- En la parte septentrional, por el pueblo de Ferreñafe (ver Plano 1) está el cono de deyección no deformado por el último ciclo de erosión al final del Pleistoceno. En su superficie hay una capa de sedimentos recientemente aportados por algunas quebradas que entren en el área, por el lado este de la zona, entre-mezclado con material eólico. Esta capa tiene un espesor de 4-5 m en la parte oriental, reduciéndose hacia la occidental. La textura es de media a gruesa. Debajo de esta manta superficial se encuentra una capa con un espesor de 10 m o más de un material compacto y casi impermeable. La textura es variable encontrándose arcilla, limo, arena y piedras angulares o canto rodado. Además contiene carbonato de calcio en cantidades variables. Aparentemente el material de esta manta ha sido depositado en forma de un flujo barroso.

- En la parte central, en la zona de la Puntilla por el este y desde allí hacia la ciudad de Lambayque por el norte y el pueblo de Puerto Etén por el sur (ver Plano 1) está la parte central del cono de deyección erosionado al final del Pleistoceno y posteriormente cubierto por los sedimentos recientes. Esta zona se puede considerar como el valle actual del río Chancay. El espesor de los sedimentos recientes varía entre menos de un metro hasta más de 12 m. En algunos lugares existen lomas, compuestas de los materiales más antiguos. Casi toda la zona es fisiográficamente una sola terraza aunque al río Reque existen terrazas jóvenes con diferencia en altura entre ellas de varios metros. Los sedimentos recientes son muy estratificados y de origen fluvial entre-mezclados con arena eólica. Los estratos no se extienden mucho en el sentido horizontal y verticalmente tienen un espesor de 0.1 - 3.0 m. La textura también es muy variable. Los estratos de arcilla son frecuentemente compactos y poco permeables, los estratos de arena (arena media) son muy permeables. Precisamente en ésta zona está ubicada el área piloto de drenaje Chacupe.

- En la parte occidental, en el límite con el Pacífico está la terraza costera. Es una faja con un ancho que varía de 3 a 5 km mar adentro cerca de los pueblos de Santa Rosa y Pimentel (ver Plano 1). Se pierde hacia el NE en el desierto de Sechura. Está compuesta de arena y piedras (canto rodado) en la capa superficial, encima de una serie de sedimentos Pleistocénicos de origen fluvial

y marino. Existen algunas hondonadas de poca profundidad que se extienden en la dirección NE-SO. Han sido llenados con sedimentos fluviales y arena eólica recientes. Estas hondonadas se angostan hacia el mar. Parece que algunos de los ramales pequeños del río Chancay han tratado de erosionar una apertura hacia el mar en el momento de la emersión de esta franja litoral.

- Como testigos de un relieve muy antiguo en el sector del cono de deyección, existen algunos promontorios denominados "montes islas". Están cerca de la ciudad de Chiclayo en la parte central y el extremo norte. Tienen una altura de más de 50-150 m por encima del relieve del cono de deyección y son compuestos de rocas ígneas y sedimentarias del Mesozoico.

2.3 Aspectos agrológicos

En el valle del río Chancay existen actualmente 70,000 ha bajo riego. El agua del río Chancay está repartida en tres ramales: los ríos Reque y Lambayeque y el canal Taymi. Con las aguas del río Reque se riega la parte meridional del valle, con el río Lambayeque la parte central y con el canal Taymi la parte septentrional respectivamente.

El sistema de riego sin embargo es deficiente, por lo tanto se está ejecutando el proyecto integral de Tinajones. Este proyecto tiene entre sus objetivos la regularización de riego para unas 100,000 ha. Esto se obtendrá a través de la incorporación de nuevas fuentes de agua y almacenamiento. Al presente se ha construido el reservorio de Tinajones con una capacidad de embalse de unos 300 millones de m³ de agua además de obras de captación de las aguas del río Chancay. También está por concluirse la derivación del río Conchano perteneciente a la cuenca Amazónica. Asimismo están proyectadas más derivaciones en esta región.

Dentro del valle propio se está construyendo un nuevo canal Taymi y se va a mejorar todo el sistema de distribución de riego. Un sistema de drenaje también será instalado.

Los cultivos predominantes son la caña de azúcar y el arroz. La caña de azúcar está cultivada en la parte central entre los ríos Lambayeque y Reque, aguas arriba de la ciudad de Chiclayo y en una pequeña extensión en la parte estrecha del valle al este de la Puntilla. La superficie bajo caña de azúcar es de unas 20,000 ha con un rendimiento de 110-120 t/ha/año.

El arroz está cultivado en las zonas adyacentes al pueblo de Ferreñafe y a la ciudad de Lambayeque y además en el valle estrecho al este de la Puntilla. La

superficie total bajo arroz es de aproximadamente 24,000 ha con un rendimiento de 4,400 kg/ha (campaña 1970/1971). Otros cultivos como la alfalfa y hortalizas están cultivados en el extremo norte, nor-este y sur-oeste del valle. Algunas áreas con frutales están cultivados cerca al pueblo de Monsefú.

2.4 Drenaje y salinidad

El problema de mal drenaje y salinidad es agudo. De un estudio de suelos efectuado en el valle Chancay-La Leche (MIN.DE AGRICULTURA, 1972) se desprende que unas 30,000 ha están afectadas en mayor o menor grado por salinidad y sodificación. Esto representa el 22.7% del área estudiada. Debe ser mencionado que los problemas de salinidad y mal drenaje se encuentran mayormente en la parte baja del valle río Chancay y en la zona del pueblo de Ferreñafe y de la ciudad de Lambayeque en el norte y nor-este del mismo valle (ver Plano 1). Una evaluación de los problemas de drenaje y salinidad realizada por SUDRET (1974) en el valle Chancay-La Leche indica que el 25% del área estudiada está afectada por problemas de drenaje y salinidad. Existen, además problemas de drenaje y salinidad incipientes en un 29% del área. En zonas con problemas incipientes, por la escasez del agua de riego, los cultivos son de corto período vegetativo y muchas áreas quedan en descanso o son cubiertas por dunas. Entonces, la recarga de agua hacia el nivel freático es reducida. El nivel freático se mantiene a una profundidad de 1.5 a 2.0 m o sea suficientemente profundo para no pensar en un proceso de salinización bajo las condiciones actuales. Sin embargo, se puede suponer que un aumento en la disponibilidad de agua traerá como consecuencia mayores problemas de drenaje y salinidad.

3. El Area Piloto de Drenaje Chacupe

3.1 Generalidades

El área piloto de drenaje Chacupe está ubicado en la parte baja del valle del río Chancay, al sur de la ciudad de Chiclayo, en una zona con severos problemas de salinidad y mal drenaje. En esta zona (3,500 ha), el 75% está afectado en mayor o menor grado de salinidad. El nivel freático en la época de barbecho está a una profundidad menor que 1.5 m en el 82% del área. El 29% de la zona está sin cultivar y en el resto se cultivan arroz, hortalizas y plantas forrajeras.

El área piloto de drenaje tiene una extensión de 36 ha. Sus suelos no habían sido cultivados por unos 25 años y su superficie estaba parcialmente cubierta con una vegetación halophytica.

La topografía de la zona, igual a la del área piloto, es plana con una pendiente de unos 0.2% en la dirección nor-este a sur-oeste.

3.2 El perfil del suelo

Los suelos son de origen fluvial. Una capa de textura franco arcillosa a arcilla se presenta entre la superficie hasta una profundidad variable entre 60 y 150 cm. Esta capa es bastante homogénea en sus características físicas y químicas. El mismo material se puede encontrar en otras partes del valle en la capa superficial. Probablemente ha sido depositado como sedimentos de los riegos que se están efectuando desde hace siglos. Por debajo de esta capa superficial la textura generalmente es mediana, variando entre franco, franco arenosa, franco limosa o arena. La descripción de un perfil típico se muestra en el Anexo 2.

El nivel freático se encontró a una profundidad variable entre 0.9 a 1.2 m.

3.3 Las características físicas del suelo

Las características físicas determinadas son la textura y la curva de retención de humedad.

Como ha sido expuesto anteriormente, los suelos son muy estratificados, con una capa superficial predominante de textura arcillosa a franco arcillosa. Por debajo de ésta, se encuentran capas de textura franco, franco limosa a franco arenosa. Algunos datos texturales se presenta en el Cuadro 1.

CUADRO 1. RESULTADOS DE ALGUNOS ANALISIS TEXTURALES

Nr. de perfil	Profundidad (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena ¹ (%)	Clasificación textural
B ₂	37-42	45.2	30.2	24.6	Ar
	65-70	51.0	39.8	9.2	Ar
	93-98	42.6	28.2	29.2	Ar
	116-121	26.6	60.0	13.4	FrL
B ₃	5-10	37.8	28.6	33.6	FrAr
	37-42	35.8	28.8	35.4	FrAr
	66-71	31.2	24.8	44.0	FrAr
	91-96	19.0	33.6	47.4	Fr
	122-127	2.0	4.2	93.8	A

¹ %arena = 100%-(% Arcilla + % Limo)

La determinación de la curva de retención de humedad (ver Anexo 1) en el suelo es de mucha importancia. Proporciona información sobre el almacenamiento de agua en el suelo y sobre la porosidad drenable, información valiosa para el riego y drenaje respectivamente.

El agua aprovechable para la planta es aquella retenida en el suelo entre la capacidad de campo y el punto de marchitez. Cuando el suelo tenga menos agua retenida que corresponde al punto de marchitez, la planta no podrá absorber más agua del suelo, y se marchitará. El punto de marchitez corresponde al valor pF de 4.2. Es un nivel bien determinado, porque la mayoría de las plantas reaccionan igual cuando el porcentaje de humedad del suelo es menor que corresponde a pF = 4.2. Al contrario, la capacidad de campo no corresponde a un nivel pF bien definido. Se define como la cantidad de agua retenida en un suelo después que el flujo descendente de agua hacia el subsuelo llega a una magnitud despreciable (normalmente ocurre 24 a 48 horas después de un riego). En los suelos de textura gruesa, la capacidad de campo es aproximadamente igual al volumen de agua retenida con valor pF = 2.0; en suelos de textura mediana y fina varia entre los valores pF de 1.9 y 2.5.

Las curvas de retención de humedad para las diferentes capas se muestran en Fig.1. De esta figura se puede deducir que el suelo retiene una regular cantidad de agua disponible para la planta, o sea de 14% en volumen para la capa de 0 a 20 cm, y de 12% para las capas más profundas hasta 90 cm de profundidad. El suelo retiene mucha agua por encima del punto de marchitez, agua que no es disponible para la planta.

De los datos de pF de las capas más profundas se puede deducir un valor aproximado sobre la porosidad efectiva o drenable. Este valor es determinado por la diferencia entre la retención de agua a pF 0.4 (aproximadamente saturación de campo) y pF 2.0. Se puede observar una porosidad efectiva de 10% en volumen, valor que es válido para las capas mencionadas, o sea las capas donde normalmente fluctúa el nivel freático (mayor de 100 cm de profundidad).

La porosidad drenable también es un valor importante para caracterizan el suelo desde el punto de vista de aeración del suelo. Se estima que valores superiores a 10% proporcionan excelentes condiciones para el desarrollo de la mayoría de los cultivos. De la Figura 1 se puede concluir que la aeración en la zona radicular (0 a 60 cm de profundidad) no es favorable.

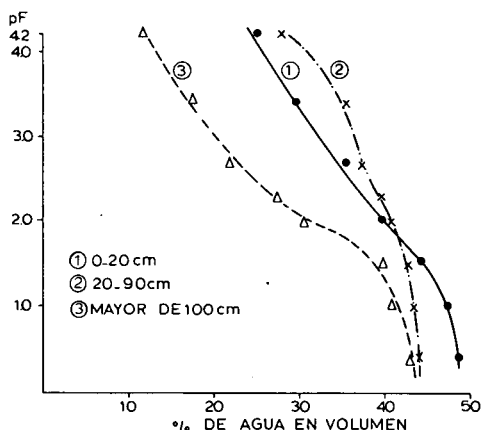


Fig. 1. Curva de retención de agua.

3.4 Características químicas del suelo

El suelo es extremadamente salino-sódico, con una Conductividad Eléctrica, medida en el extracto de saturación (CE_e) de 153 mmhos/cm a 25 °C para la capa superficial (0 a 10 cm), disminuyendo la salinidad con la profundidad. El valor del Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) en la capa superficial es de 60. Contiene carbonato de calcio y yeso. La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) en la capa superficial de textura fina es alrededor de 30 meq/100 g de suelo, pero disminuye a mayor profundidad donde la textura es media.

CUADRO 2. CARACTERISTICAS QUIMICAS DEL SUELO. DATOS INICIALES PROMEDIO (n=36)

Profundidad (cm)	CE _e (mmhos/cm a 25 °C)	PS ¹ (%)	pH 1:1	CaCO ₃ (%)	Yeso (%)	RAS ²	PSI ³	CIC (meq/100 g)
0 - 10	153.0	46.0	7.4	4.9	1.7	102	60	30.2
10 - 20	116.2	48.6	7.5	5.1	1.6	88	57	29.7
20 - 40	63.9	57.0	7.9	5.5	0.7	75	52	30.6
40 - 60	37.5	55.3	7.9	4.8	0.7	64	48	29.1
60 - 80	29.4	52.7	8.2	5.0	0.8	55	44	30.1
80 - 100	25.6	48.2	8.3	5.4	0.6	46	40	28.6
100 - 120	24.2	45.9	8.0	5.2	0.6	38	35	29.8
120 - 160	22.3	43.8	7.9	4.6	0.5	35	33	26.4
160 - 200	18.6	44.6	8.2	6.0	0.4	28	29	24.3
200 - 240	19.3	42.5	8.2	6.0	0.2	29	30	21.3

¹ Porcentaje de Saturación (PS)² Relación de Adsorción de Sodio (RAS)³ El valor PSI ha sido deducido del valor RAS del extracto de saturación según RICHARDS (1954, Fig.27)

En el Cuadro 2 se da un resumen de los resultados de los análisis químicos efectuados en los suelos de Chacupe. Son datos promedios pero debe remarcarse que dentro del área piloto de drenaje Chacupe se observó mucha variación entre los diferentes puntos de muestreo. La salinidad en la parte oeste del área piloto fué más alta y en la parte este más baja que el promedio. En lo que se refiere al PSI y al contenido de yeso, ambos varían mucho a muy corta distancia.

3.5 Características mineralógicas

La composición mineralógica de la fracción menor de 2 micrones fué determinada¹ empleando el método descrito por ALEXIADES y JACKSON (1966). Es un método semi-quantitativo. Los resultados se muestran en el Cuadro 3.

CUADRO 3. COMPOSICION MINERALOGICA DE LA FRACCION MENOR DE 2 MICRONES, EN PORCENTAJE DE LA FRACCION MINERAL

Profundidad (cm)	Fracción amorfa	Feldespatos de Na y Ca	Quarzo	Caolinita	Illita	Montmorillonita
0 - 10	9	5	6	15	35 ¹	30
20 - 40	8	5	10	12	29 ¹	36
120 - 160	10	5	6	10	19 ¹	50

¹ Parcialmente (menos que 50%) la illita está constituida por interstratificaciones illita-montmorillonita

¹ Especial agradecimiento se debe al Instituto de Suelos (STIBOKA) en Wageningen, Holanda, para la realización de los análisis, presentados en el Cuadro 3.

4. Desarrollo físico del area piloto de drenaje

4.1 Generalidades

A mediados de 1970 se inició el desarrollo físico del Area Piloto de Drenaje. Ha sido ejecutado en dos etapas (ver Plano 2): la primera etapa en la parte oeste (17.5 ha) y la segunda parte en la parte este (19.2 ha). La segunda etapa ha sido ejecutada en el año 1972.

4.2 Las actividades realizadas

4.2.1 Instalación del sistema de drenaje

En la primera etapa se excavó un dren colector abierto de 830.5 m de longitud por el lado sur y este de la primera etapa. Tiene una profundidad promedio de 2.9 m y en él desembocan 20 drenes subterráneos instalados entre 1.7 m y 2.0 m de profundidad. En la parte baja del dren colector (S0), se instaló una estación de bombeo para evacuar las aguas de éste hacia el dren Pomalca. Este último es un dren poco profundo y forma parte de una red de colectores construídos en la parte baja del valle para evacuar las aguas superficiales.

En la segunda etapa se instalaron 5 drenes entubados. Estos drenes desembocan en la parte oriental del dren colector antes excavado.

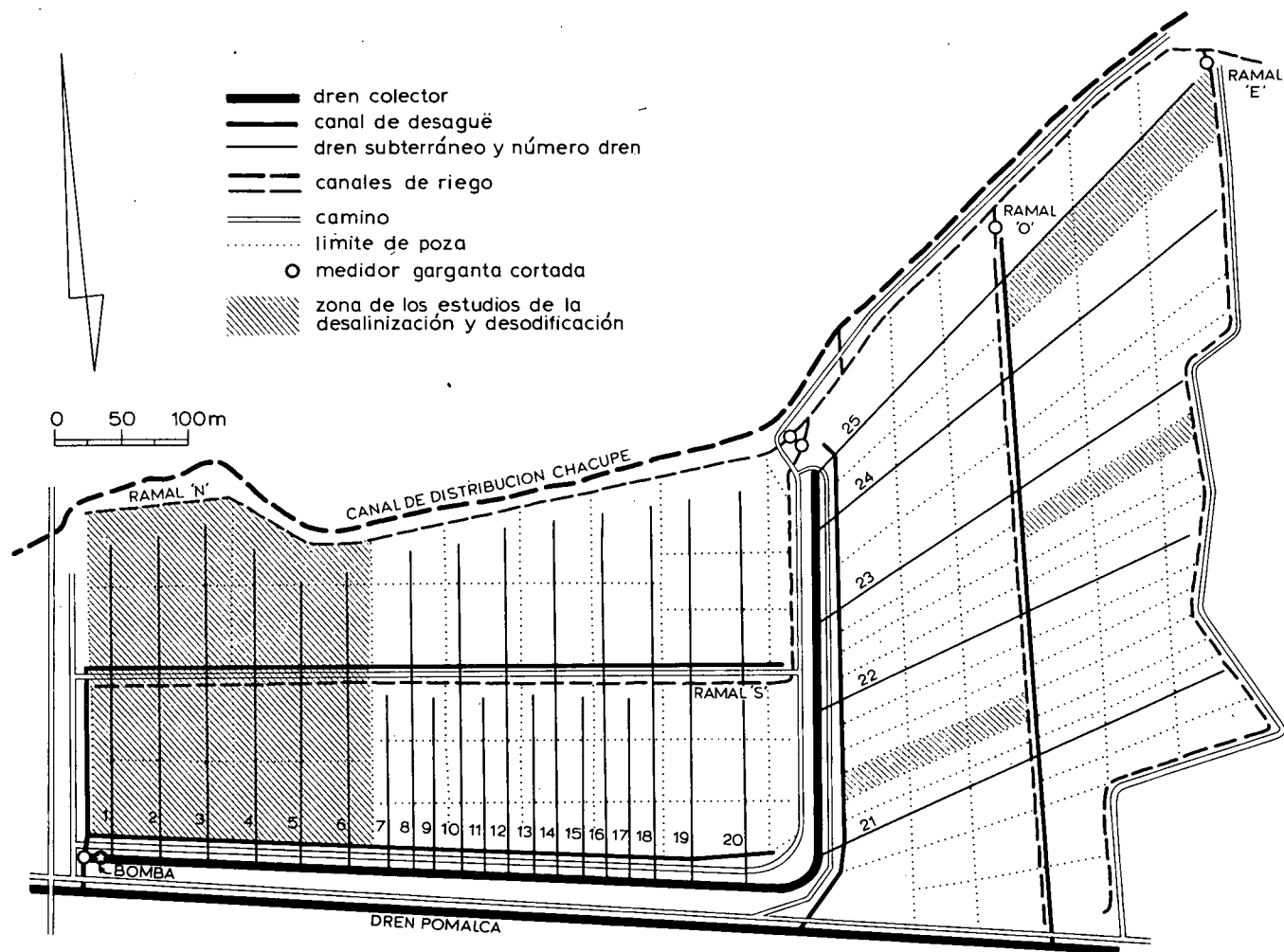
4.2.2 Instalación del sistema de desagüe

En la primera etapa un sistema de desagüe ha sido instalado para captar la escorrentía superficial. Estas aguas son conducidas hacia el colector Pomalca. En la segunda etapa el sistema de desagüe desemboca directamente en el colector Pomalca.

4.2.3 Instalación del sistema de riego

Se construyó una estructura de captación en el canal de riego Chacupe, el cual pasa por el lado norte del Area Piloto. El sistema de riego interno se realiza por medio de dos ramales de 200 l/seg para regar las partes norte y sur. El volumen de agua que entra en cada ramal es medido por un medidor del tipo "garganta cortada" (cut-throat flume).

Para captar el agua de riego para la segunda etapa se mejoró una toma de agua existente en el canal de riego Chacupe a más de 400 m, aguas arriba al este del Area Piloto. Se conectó el sistema de riego en la primera y segunda etapa. El sistema de riego interno en la segunda etapa consiste de 2 ramales de 200 l/seg para regar las partes oeste y este.



Plano 2. Area Piloto de Drenaje Chacupe.

4.2.4 Preparación del terreno

El suelo ha sido subsolado y arado. Debido a la dureza del suelo, el subsolado alcanzó una profundidad de solamente 0.18 m y la aradura hasta 0.08 m de profundidad. Posteriormente el terreno ha sido dividido en unidades de riego (pozas), mediante la construcción de bordos. Dentro de cada poza se ha nivelado el terreno a cero en la dirección este-oeste y con una ligera pendiente (casi igual a la pendiente natural) en la dirección norte-sur. Aunque el suelo es duro y tiene baja velocidad de infiltración, el material de relleno en las zanjas excavadas para la instalación de drenes de campo, estuvo mucho más suelto y tuvo mayor velocidad de infiltración. Entonces, existió el peligro que el suelo de relleno sea arrastrado llenando los drenes con sedimentos o destruyéndolos. Para evitar esto, ha sido necesario levantar bordos a los costados de los drenes instalados y mantenerlos intactos durante el primer año de recuperación.

Después de la primera campaña de arroz se realizó una nueva nivelación, dejando el terreno en cada poza nivelado a cero.

La preparación del terreno en la segunda etapa ha sido semejante al de la primera. La nivelación ha sido ejecutado con mayor precisión y se dejó el terreno nivelado a cero dentro de cada poza de riego antes de iniciar el lavado de suelos. El subsolado alcanzó una profundidad de 0.5 m.

5. Lavado y campañas agrícolas

5.1 Lavado

El lavado de la primera etapa tuvo una duración de solamente 2 meses. Se aplicó una lámina de agua de aproximadamente 450 mm. La salinidad en la capa superficial de 0 a 20 cm, fué reducida hasta un cuarto de la salinidad inicial (6.6% versus 1.7% de sal).

El lavado de la segunda etapa ha sido mucho más largo, es decir 11 meses. Se aplicó una lámina de 1,930 mm en promedio. La salinidad en la capa superficial de 0 a 20 cm fué reducida hasta un sexto de la salinidad inicial (5.5% versus 0.9% de sal).

5.2 Campañas de arroz

Se consideró el arroz como el cultivo más indicado para ser implantado durante la recuperación (CENDRET, 1970). Con un cultivo de arroz se mantiene permanentemente una lámina de agua en la superficie del suelo y entonces el suelo está bajo un régimen de lavado continuo. El agua al infiltrarse en el suelo percola a través del perfil hacia el nivel freático. En su paso, las sales son disueltas y conducidas hacia el sistema de drenaje y posteriormente evacuadas por el colector fuera del área.

Para la primera campaña de arroz (1970-1971) se transplantó 3 variedades de arroz. Según la experiencia de la región, estas variedades tienen un alto grado de tolerancia a sales. Son las variedades IR5, Minagra y Lambayeque. Esta primera campaña no tuvo éxito debido al alto grado de salinidad: la CE_e en la capa de 0 a 20 cm de profundidad era de 40 mmhos/cm a 25 °C en promedio en el momento de transplante. Además, el transplante se realizó muy tarde desde el punto de vista de las condiciones climatológicas de la zona. Se sembró 7.9 ha y el rendimiento fué de 580 kg/ha.

En la segunda campaña de arroz (1971-1972) se transplantó 3 variedades bajo condiciones climatológicas más apropiadas. Fueron IR8, Minagra y CEL 985. En el momento del transplante la capa de 0 a 20 tenía una CE_e de 19 mmhos/cm en promedio. El rendimiento de las 11.4 ha transplantadas fué de 4,850 kg/ha muy superior al promedio de la zona (unos 3,500 kg/ha). En la tercera campaña de arroz (1972-1973) se transplantó 2 variedades, IR8 y Naylamp. Los almácigos fueron preparados por primera vez en el área piloto. En 9.1 ha el arroz ha sido transplantado bajo condiciones climatológicas apropiadas y 2.3 ha han sido transplantadas tardíamente. La CE_e medida en la capa superficial (0 a 20 cm) era de

16 mmhos/cm en promedio. El rendimiento promedio fué 5,820 kg/ha. Sin embargo, el rendimiento del arroz transplantado a tiempo fué de 6,400 kg/ha y el rendimiento del arroz transplantado tardíamente solamente 3,520 kg/ha.

5.3 Campañas de invierno

En el invierno (barbecho) del año de 1972 se sembró maíz y trigo en una superficie reducida. Tenía como propósito visualizar el estado de recuperación de los suelos. El rendimiento ha sido muy bajo, se notó un efecto marcado de la salinidad en el suelo y además ciertos efectos de una aeración deficiente. Aunque los cultivos de invierno escogidos son de corto período vegetativo, la cosecha se realizó tan tarde que fué necesario postergar el transplante de arroz un mes. Este atraso trajo como consecuencia una reducción muy grande en el rendimiento del arroz en la campaña 1972-1973 (Cap.5.2).

En el invierno del año de 1973 se sembró sorgo en una área pequeña. Este cultivo también ha sido afectado por efectos combinados de salinidad y mal aeración. El rendimiento fué bajo, se cosechó solamente 1,000 kg/ha.

5.4 Investigaciones y muestreos

5.4.1 Líneas de investigación

Como objetivo de estudio se planteó dos líneas de investigación (CENDRET, 1970)

- Investigaciones sobre el funcionamiento del sistema de drenaje y el comportamiento de los materiales empleados tanto tubos como filtro-protectores. Dentro de esta línea de investigación también se ha evaluado las características hidrodinámicas del subsuelo y calculado los costos de la instalación de un sistema de drenaje de campo.

- Investigaciones en la recuperación de los suelos afectados por salinidad, sodificación y mal drenaje. Dentro de esta línea de investigación también se ha establecido un balance de agua con el propósito de calcular el consumo real del cultivo de arroz y el ingreso subterráneo de agua en la zona y evaluado algunos métodos de análisis de suelos (ver Anexo 1).

5.4.2 Muestreo de suelos

Para describir el proceso de la desalinización y desodificación, en la primera etapa se ha tomado muestras en los siguientes momentos:

- antes de iniciar el lavado (hasta 240 cm de profundidad)
- durante el lavado (hasta 100 cm de profundidad), y
- antes y después de cada campaña de arroz (hasta 240 cm de profundidad).

En la segunda etapa las muestras fueron tomadas antes y durante el lavado hasta una profundidad de 100 cm.

Las muestras fueron analizadas según métodos conocidos (ver Anexo 1).

5.4.3 Recolección de datos hidrométricos

Para evaluar el funcionamiento del sistema de drenaje y el comportamiento de los materiales de drenaje (tubos y materiales filtroprotectores), se instalaron piezómetros ubicados en baterías perpendiculares a las líneas de drenes. Cada semana o cada dos semanas se tomó una lectura del nivel de agua en los piezómetros.

Con la misma finalidad y además para realizar un balance de agua, se midió la descarga de los drenes de campo diariamente. El agua del dren colector, bombeada hacia el dren Pomalca, fué medida mediante un aforador del tipo "garganta cortada", el cual está equipado con un limnógrafo e instalado en el tramo final del canal de desagüe. Por el mismo aforador pasan también las aguas de escorrentía superficial.

6. Evaluación del sistema de drenaje

6.1 Generalidades

El sistema de drenaje (ver Plano 2) consiste de un dren colector de una longitud de 830.5 m y una profundidad promedio de 2.9 m y una serie de 25 drenes de campo.

Los drenes de campo en la primera etapa tienen un espaciamiento entre ellos de 18 a 36 m. Tienen una profundidad de 2.0 y 1.7 m. En la zona central de la primera etapa se encontró una capa de arcilla poco permeable a 1.7 m de profundidad. Por eso se instaló algunos drenes de campo a esta profundidad, ya que no conviene instalar drenes dentro de una capa poco permeable.

En la segunda etapa los drenes han sido instalados a una profundidad de 2.0 m y con espaciamientos variables entre 50 y 100 m. El agua captada por los drenes de campo es evacuada hacia el dren colector y luego es bombeada al dren Pomalca.

Para llegar al espaciamiento de drenes de 18 a 36 m en la primera etapa, se efectuó un cálculo empleando la fórmula de HOOGHOUTT (ver Anexo 3). El espaciamiento calculado posteriormente ha sido modificado por tener un número aconsejable de combinaciones tubo-filtroprotector para las investigaciones respectivas.

El espaciamiento entre drenes de campo en la segunda etapa resultó de las experiencias obtenidas en la primera etapa.

La longitud de los drenes en la primera etapa varía entre 140 y 320 m y en la segunda etapa entre 300 y 395 m. En total se instaló una longitud de 6,100 m de drenes de campo en toda el área.

La pendiente de los drenes varía entre 0.12 y 0.20%.

Las siguientes combinaciones en materiales para tubos y filtroprotector fueron instaladas:

- tubos de arcilla con paja de arroz
- tubos de arcilla con lana de vidrio
- tubos de arcilla con banda de lino
- tubos de arcilla con grava (en la segunda etapa)
- tubos de arcilla sin filtroprotector
- tubos de plástico liso con lana de vidrio
- tubos de plástico liso con banda de lino, y
- tubos de plástico corrugado con paja de arroz.

Los tubos de arcilla tienen un diámetro de 10 cm, el menor diámetro que son producidos en el Perú hasta el momento. Los tubos de plástico (PVC) liso con diámetro de 50 y 70 mm y de plástico corrugado con diámetro de 65 mm fueron importados.

Como materiales filtroprotectores fueron empleados la paja de arroz, que es abundante en la zona y la grava, que se encuentra en una cantera a una distancia de 40 km del área piloto. Además se utilizó la banda de lino y la lana de vidrio, ambos materiales importados.

Con respecto a la evaluación del funcionamiento del sistema de drenaje, los siguientes factores fueron considerados importantes:

- el nivel freático en la época de cultivo (arroz) y barbecho
- el efecto del dren colector, y
- el comportamiento de los tubos y de los materiales filtroprotectores.

6.2 Fluctuación del nivel freático

Antes de la instalación del sistema de drenaje, el nivel freático en el Area Piloto Chacupe fluctuó entre 0.9 y 1.2 m de profundidad. El nivel freático en verano estaba aproximadamente 0.2 m menos profundo que en el invierno. Después de la instalación del sistema de drenaje (colector y drenes entubados de campo), el nivel freático en la primera etapa fluctúa entre 1.8 y 2.0 m de profundidad en la época de barbecho (invierno) y 1.3 a 1.6 m de profundidad durante la campaña de arroz (verano).

En la segunda etapa, donde los drenes entubados de campo son más espaciados, generalmente el nivel freático se mantiene a menor profundidad: cinco semanas después del último riego, el nivel freático fluctuaba a una profundidad de 1.1 a 1.6 m, tres semanas después fluctúa entre 1.3 y 1.7 m de profundidad. Durante la campaña de arroz el nivel freático está a una profundidad de 0.4 a 1.2 m. La menor profundidad se encuentra en la parte norte de la segunda etapa, donde el subsuelo hasta una profundidad de más de 4.0 m es arcilloso. La mayor profundidad se encuentra en la parte sur, donde el subsuelo es de textura media a gruesa.

6.3 El efecto del dren colector

El efecto del dren colector es notable. Esto fué deducido de la curva del perfil del nivel freático perpendicular al eje del colector en la segunda etapa, antes

de la instalación de los drenes de campo (CENDRET, 1971 b). El radio de influencia del colector se estimó en 250 m desde su eje. Además, se puede apreciar su efecto cuando se hace una comparación de la descarga del sistema de bombeo con la descarga de los drenes de la primera etapa. La diferencia entre los dos valores es el flujo de agua captado directamente por el colector. Se hizo una comparación para 2 fechas distintas: una durante el barbecho y una durante la campaña de arroz. En el Cuadro 4 se resume esta influencia. En general, la captación directa del colector varía entre 1.0 hasta 2.8 veces la captación del sistema de drenes entubados de campo.

CUADRO 4. COMPARACION DE LA CAPTACION DE AGUA DIRECTAMENTE
POR EL COLECTOR Y POR EL SISTEMA DE DRENES ENTUBADOS DE CAMPO

Epoca	Descarga sistema de drenes de campo (l/seg)	Captación del colector (l/seg)
Riego marzo de 1972	5.1	5.3
Barbecho en setiembre de 1972	1.8	5.1

De un estudio detallado (ORE, 1972), se ha deducido que el colector capta un volumen de agua de 460 m³/día en promedio (0.64 l/seg por 100 m de colector) en la época de barbecho. Suponiendo que toda la descarga del colector en la época de barbecho es proveniente de la recarga subterránea (no riegan en la zona) y que esta recarga subterránea es del orden de 1 mm/día (Cap.7.2), se llega a la conclusión que el dren colector contribuye al drenaje de por lo menos 46 ha. Con la longitud del dren colector y la superficie drenada conocida, el radio de influencia calculado es alrededor de 275 m.

Debe ser anotado que el efecto del dren colector no es el mismo a lo largo de todo su longitud. En su parte alta el dren colector capta aproximadamente 1 l/seg por 100 m de dren mientras en su parte baja unos 0.4 l/seg por 100 m de dren colector. En su parte alta, el colector atraviesa mayormente capas de textura moderadamente gruesa y media (FrA y FrL), mientras en su parte baja la textura de las capas atravesadas es de media a fina (ArL, FrAr y Ar). De lo anterior se puede concluir que sea más económico y efectivo ejecutar drenes profundos (2.5 m) muy espaciados, en lugar de una red densa de drenes superficiales (1.7 a 2.0 m), si es que el dren profundo puede atravesar capas arenosas de alta conductividad hidráulica.

Como ya ha sido expuesto (Cap.2.2), el subsuelo en la zona del área piloto y en gran parte del valle es muy heterogéneo. En tales condiciones será difícil diseñar un sistema de drenaje según normas bien establecidas. Por conocido que sea el lugar donde se presenten las vetas arenosas y permeables en el subsuelo, aun así no siempre sea posible proyectar el futuro sistema de drenaje en mencionadas vetas. La ubicación de los drenes colectores dependerá mayormente de la topografía. Entonces, la contribución que tendrá el futuro sistema de colectores sobre el drenaje en la zona se puede estimar pero no calcular con mucha exactitud. Para evitar que el sistema de drenaje sea sobrediseñado, es aconsejable diseñar el sistema de los drenes troncales, colectores y drenes secundarios, en forma definitiva. La necesidad de un sistema de drenes de campo debe ser evaluado también con fines de financiamiento del proyecto. Sin embargo, el diseño de tal sistema debe ser considerado como tentativo. Durante la excavación de los drenes principales, el efecto del mismo sobre la depresión del nivel freático deberá ser evaluado y así podremos modificar el diseño tentativo del sistema de drenaje de campo empleando criterios más reales.

6.4 El comportamiento de los tubos y de los materiales filtroprotectores

Un análisis del comportamiento de los tubos y de los materiales filtroprotectores comprende dos aspectos:

- la resistencia de entrada del material alrededor del tubo, y la
- sedimentación dentro del tubo y dislocación o rotura en la línea de tubos.

En las fórmulas de drenaje, empleadas para calcular el espaciamiento entre las líneas de drenes (ver Anexo 3), se tiene en cuenta las características hidrodinámicas del perfil del suelo. Cuando fracasa un sistema de drenaje, muchas veces se debe a fallas en la vecinidad inmediata del dren. Por esto, en los últimos años se está dando importancia en la zona cercana al tubo. La pérdida de carga hidráulica total originada por la resistencia al flujo de un sistema de drenaje de tubos está constituida por los siguientes componentes (FAO, 1972):

$$\Delta h = \Delta h_h + \Delta h_v + \Delta h_r + \Delta h_e$$

Δh = pérdida de carga hidráulica total (m)

Δh_h = pérdida de carga hidráulica debida a la componente horizontal del flujo (m)

Δh_v = pérdida de carga hidráulica debida a la componente vertical del flujo (m)

Δh_r = pérdida de carga hidráulica debida a la componente radial del flujo (m), y

Δh_e = pérdida de carga hidráulica debida a la resistencia de entrada del agua en la zona inmediata al tubo de drenaje y al tubo mismo (m).

La pérdida de carga hidráulica debida a la componente horizontal y vertical del flujo, Δh_h y Δh_v en la Ec.(1), son determinadas por las características hidrodinámicas del subsuelo. La pérdida de carga hidráulica debida a la componente radial del flujo, Δh_r en la Ec.(1), también es determinada por las características del subsuelo y la geometría de la zanja donde se coloca el dren entubado. Se supone que el dren es un "dren ideal", es decir la pared del dren tiene la misma conductividad hidráulica que el suelo.

Sin embargo, en la pared del tubo, impermeable al agua, existen aperturas a través de las cuales el agua entra al dren. Las aperturas son distribuidas a lo largo de la pared; distribución que depende del tipo de tubo. En su pase hacia estas aperturas el agua tiene que superar una resistencia extra que se llama "resistencia de entrada". Depende del diámetro del tubo, la superficie total de las aperturas, la distribución de éstas a lo largo de la pared y la conductividad hidráulica del material de relleno en la zanja (es decir en las inmediaciones del tubo). En resumen entonces, se define la resistencia de entrada como la oposición que ofrece el sistema filtroprotector al ingreso del flujo de agua por efecto de la convergencia de las líneas de flujo en las cercanías de la tubería de drenaje.

Matemáticamente, la pérdida de carga hidráulica debida a la resistencia de entrada se define como:

$$\Delta h_e = qLw_e \quad (2)$$

$$\Delta h_e = Qw_e \quad (3)$$

donde.

q = la recarga (normativa) (m/día)

L = espaciamiento entre drenes (m),

Q = descarga de los drenes por unidad de longitud ($m^2/día$) y

w_e = la resistencia de entrada (día/m).

Para que la resistencia de entrada sea mínimo, es usual emplear un material permeable que está colocado alrededor del tubo. Este material tiene doble función: facilitar el paso del agua al tubo y evitar la entrada al mismo de materiales finos.

Entonces es un material que debe ser filtrante y además protector; así se deduce el nombre filtroprotector. Las dos funciones parecen estar en contradicción: para facilitar el paso del agua al tubo, el material filtroprotector debe ser permeable, sin embargo para evitar la entrada al tubo de materiales finos (arena fina, limo) el material filtroprotector no debe ser muy permeable.

Para evaluar la resistencia de entrada se debe contar con mediciones de descarga de drenes y de lecturas de piezómetros. Los piezómetros son instalados uno sobre el tubo de drenaje (por medio de una perforación en la pared del tubo, la sonda acústica puede bajar dentro del tubo, para medir el nivel de agua en ello) y el otro al costado del mismo. Arbitrariamente los piezómetros al costado del dren fueron instalados a una distancia de 10 cm del eje del tubo de drenaje. Esta distancia equivale más o menos el límite exterior del material filtroprotector en el caso de los tubos de arcilla que tienen un diámetro interno de 10 cm. Sin embargo, en el caso de los drenes de plástico que tienen menor diámetro, se incluirá además del material filtroprotector una parte del suelo de relleno. La pérdida de carga hidráulica debido a la resistencia de entrada, el valor Δh_e en la Ec.(2) y Ec.(3) es la diferencia entre las lecturas de los piezómetros instalados sobre el tubo de drenaje y a 10 cm del eje del mismo.

La descarga del dren por día y por unidad de longitud se calcula dividiendo los datos de descarga, expresados en $m^3/día$ por la longitud del dren expresada en metros. Con los datos de Δh_e y Q medidos es posible calcular gráficamente la resistencia de entrada. Ploteando en escala simple la descarga Q versus la carga hidráulica a 10 cm; del eje del tubo, el resultado será una relación lineal según la Ec.(3). La resistencia de entrada es dada por la tangente del ángulo ($Tg \alpha$) que forma la recta con la horizontal positiva. En la práctica el cálculo mediante el método gráfico no es tan simple debido a muchas irregularidades en las mediciones sobre todo de las lecturas de los piezómetros (CENDRET, 1971 b). Muchas lecturas del nivel de agua en el tubo de drenaje resultaron en valores negativos, o sea como que estuviera el agua debajo del fondo del tubo, lo cual es imposible. Esto se debe a pequeños errores en la nivelación o hundimiento de los piezómetros después de su instalación. Además, las mediciones del nivel de agua en los piezómetros con una sonda acústica no son muy precisas. Por estas razones y también para evaluar la sedimentación (arenamiento) en los drenes, los valores de tangente del alfa fueron determinados en la siguiente forma. Se graficó el nivel del agua dentro del tubo de drenaje con excepción de valores negativos, versus la descarga; en la misma figura, se graficó también el nivel del agua en los piezómetros a 10 cm del eje del tubo de drenaje versus la descarga.

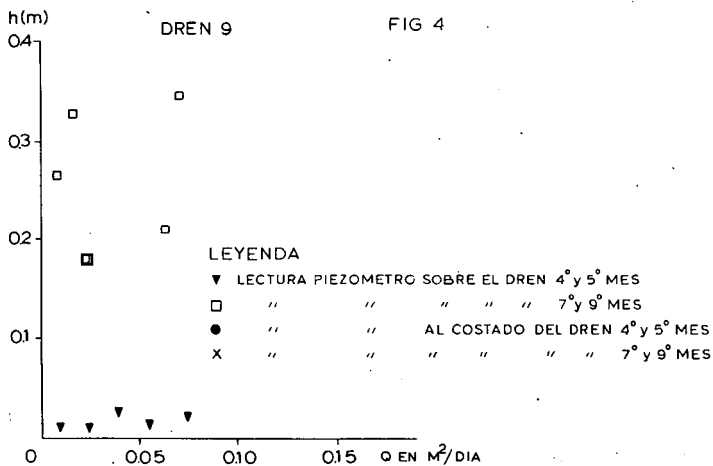
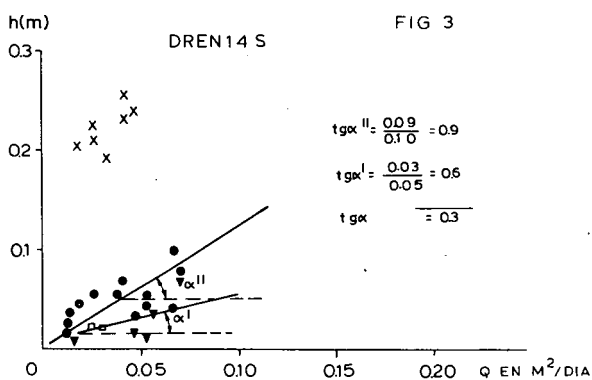
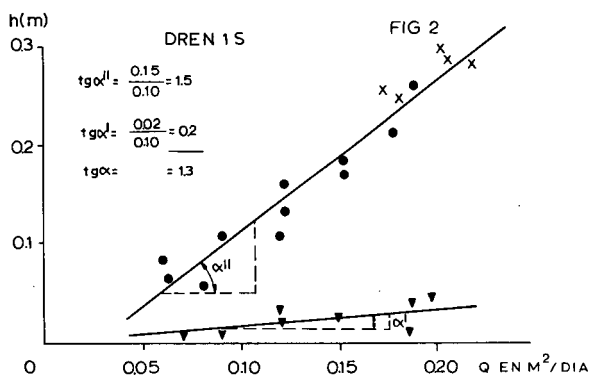


Fig.2, 3, 4. Determinación grafimétrica de la resistencia de entrada.

A través de los puntos plateados de la primera relación se trazó una línea de la cual se obtuvo el valor $\text{tg } \alpha'$ y en igual forma para la segunda relación, obteniéndose el valor $\text{tg } \alpha''$. La diferencia de ambas relaciones ($\text{tg } \alpha'' - \text{tg } \alpha'$) corresponde a la resistencia de entrada. En la Figura 2 y 3 puede apreciarse la determinación gráfica de la resistencia de entrada.

Fueron plateados los registros de dos períodos, el primero de ellos los registros del cuarto y quinto mes después de la instalación del sistema de drenaje y el otro corresponde al séptimo y noveno mes. Se puede observar que la resistencia de entrada no ha aumentado con el tiempo en el dren 1 S (ver Fig.2). Sin embargo, en el dren 14S (ver Fig.3) se puede notar un aumento marcado en la resistencia de entrada, aumento que se debe a una descomposición de los filtroprotectores de material orgánico, dispersión del suelo de relleno y la penetración de partículas finas dentro del filtroprotector.

Con respecto a los registros del nivel de agua en los piezómetros sobre el dren, se ha graficado solamente los registros del primer período de medición por ser los niveles en el segundo período igual en casi todos los casos. Sin embargo, un aumento abrupto en el nivel de agua en los piezómetros sobre el dren es una indicación de que el dren está arenado y obstruido. Este fenómeno se puede apreciar por ejemplo en la Figura 4. Se ve arenamiento en el dren en el período del quinto al séptimo mes después de su instalación. Los resultados de las determinaciones de la resistencia de entrada y los signos de arenamiento, se muestran en los Cuadros 5 y 6.

Se puede considerar la resistencia de entrada alta cuando tiene un valor mayor de 0.5 día/m. En el área piloto con excepción de la grava, los demás materiales filtroprotectores empleados entonces no han funcionado bien.

En el Cuadro 5, puede observarse además que la resistencia de entrada tiende a subir con el tiempo y que ésta es más alta en el caso de materiales filtroprotectores en combinación con tubos de plástico que combinado con tubos de arcilla.

Esta diferencia se debe al diámetro del tubo. Empleando tubos de arcilla, que tienen mayor diámetro, el piezómetro instalado a una distancia de 10 cm del eje del tubo de drenaje está puesto exactamente al costado del material filtroprotector. Sin embargo, con los tubos de plástico, que tienen menor diámetro, el piezómetro está ubicado dentro del material de relleno. Este material de relleno está constituido por suelo dispersado y poco permeable, debido a la alta cantidad del sodio intercambiable, lo cual dio lugar al aumento de la re-

sistencia de entrada.

En el Cuadro 6 puede observarse que los materiales filtroprotectores dejan pasar cierta cantidad de material fino con excepción de la lana de vidrio. Los sedimentos mayormente son de textura franca.

CUADRO 5. RESISTENCIA DE ENTRADA PROMEDIO (VALORES DE $\text{tg } \alpha$) DE LAS DIFERENTES COMBINACIONES TUBO-FILTROPROTECTOR

Registros del cuarto y quinto mes después de la instalación

Tipo de material filtroprotector	Tipo de tubo	
	Arcilla	Plástico
Lana de vidrio	1.8	1.7
Paja de arroz	0.9	8.8
Paja de lino	2.0	6.6
Grava	0.2	
Sin filtroprotector	6.9	

Registros del séptimo y noveno mes después de la instalación

Tipo de material filtroprotector	Tipo de tubo	
	Arcilla	Plástico
Lana de vidrio	1.8	2.1
Paja de arroz	3.3	8.8
Paja de lino	2.0	9.0
Grava	0.4	
Sin filtroprotector	16.0	

CUADRO 6. PORCENTAJE DE LA TUBERIA CON SIGNOS DE ARENAMIENTO

Tipo de material filtroprotector	Tipo de tubo	
	Arcilla	Plástico
Lana de vidrio	0	0
Paja de arroz	30	50
Paja de lino	50	25
Grava	20	

6.4.1 Paja de lino

La paja de lino es un residuo vegetal que se presenta en bandas de 25 m de largo por 15 cm de ancho y 2 cm de espesor. Este material puede ser colocado según el caso: si es tubo de plástico, se envuelve el tubo antes de ser colocado y si es tubo de arcilla, se coloca una banda bajo y otra por encima de la tubería. La banda de paja de lino es un material que se emplea con mucho éxito en Holanda en Bélgica.

La resistencia de entrada encontrada para este material fué alta cuando se empleó con tubos de arcilla y muy alta con los tubos de plástico. Esta diferencia se debe a un diámetro distinto de los tubos empleados y el relleno de suelo dispersado (ver Cap.6.4).

Dos años después de la instalación del sistema de drenaje, se abrió una calicata sobre los drenes y se observó que la paja de lino no sufrió cambios sustanciales; no hubo efecto de compactación ni decomposición microbiana. La alta resistencia de entrada se explica por la obstrucción paulatina del material filtroprotector con el suelo fino del relleno. El suelo de relleno por tener un alto contenido de sodio intercambiable no tiene una estructura estable, y así es transportado fácilmente por el agua que entra en la zona circundante al dren. Parte de este material se sedimenta dentro de la paja de lino y parte dentro del tubo. Por tener el tubo de arcilla mayor diámetro, parte de la superficie del tubo no ha sido cubierto por material filtroprotector, en consecuencia la sedimentación en los tubos de arcilla fué más notoria.

6.4.2 Paja de arroz

Este es un material (rastroy de arroz) que se encuentra en abundancia en la zona y a un costo mínimo. Por estar en forma suelta, se lo puede acomodar alrededor de los tubos de drenaje.

La resistencia de entrada es alta y de las observaciones realizadas en las calicatas se puede concluir que la paja de arroz se descompuso rápidamente y no actuó como material filtroprotector. El grado de sedimentación dentro de los tubos ha sido alto. La marcada diferencia entre la resistencia de entrada en tubos de arcilla y de plástico se debe, como ha sido expuesto anteriormente, al incluirse en el caso de los tubos de plástico en la medición de la pérdida de la carga hidráulica una parte del relleno compuesto de suelo dispersado y poco permeable.

6.4.3 Lana de vidrio

La lana de vidrio es un material sintético que para uso en drenaje se presenta en forma de bandas de 50 m de largo por 15 cm de ancho y 1.5 cm de espesor. El producto fué importado con miras a una futura fabricación del material en el país. Puede ser colocado según el caso (ver Cap.6.4.1). Dicho material es fácil de emplear, pero debido a su estructura fina posee una alta resistencia de entrada, que varía entre 1.8 y 2.1. En Holanda, también se ha encontrado valores

altos, que fluctúan entre 0.5 y 2.5. No deja pasar el material fino del suelo de relleno, por lo tanto las tuberías cubiertas con este material no han tenido una sedimentación notable.

6.4.4 Grava

La grava es un material mineral que se encuentra en abundancia en todos los valles de la Costa Peruana. Sin embargo no siempre se puede emplear este material como filtroprotector, debido a la gran variabilidad en la distribución granulométrica. Con respecto a la distribución granulométrica requerida para la grava, no existen datos concretos. Una guía para determinar el tamaño de las partículas de la grava empleada en el Area Piloto Chacupe ha sido la relación empírica que existe entre el tamaño de la grava empleada en filtros de pozos tubulares y la textura del subsuelo alrededor de estos (LUTHIN, 1957). La distribución granulométrica de la grava empleada en el Area Piloto Chacupe se muestra en la Figura 5, juntamente con la distribución granulométrica de la grava empleada en el Area Piloto de Drenaje La Boya en el sur de Perú (CENDRET, 1972).

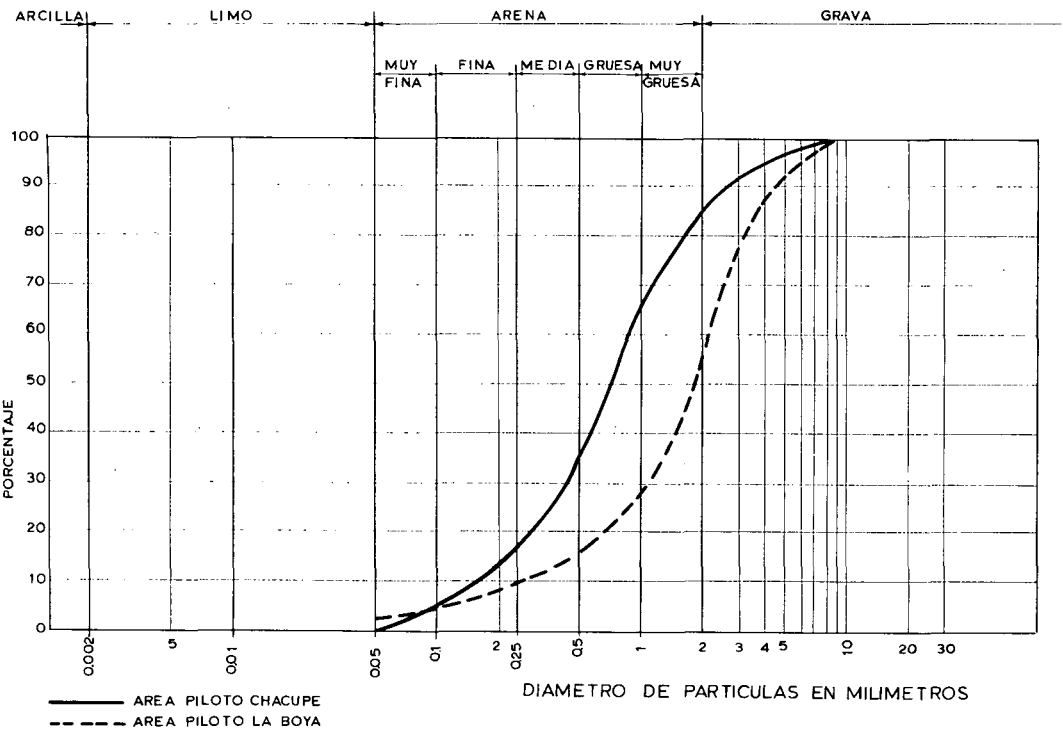


Fig.5. Curva de distribución granulométrica de la grava empleada como filtroprotector.

La grava es un material que da valores de baja resistencia de entrada aunque hay cierta tendencia de que se incremente un poco con el tiempo. En el Area Piloto La Boya, la resistencia de entrada resultó estar relacionada con el volumen de grava aplicada. Con un volumen de $2.5 \text{ m}^3/100 \text{ m}$ de dren, la resistencia de entrada en promedio fué de 1.05 día/m , pero con un volumen de grava de $5.0 \text{ m}^3/100 \text{ m}$ de dren, solamente fué de 0.12 día/m . Con esta experiencia se decidió aplicar un volumen de $5 \text{ m}^3/100 \text{ m}$ de dren en la segunda etapa del Area Piloto Chacupe.

Del Cuadro 6 puede concluirse que el grado de arenamiento para la grava es notable, indicando que la grava empleada en el Area Piloto de Chacupe es demasiado gruesa. De los signos de arenamiento en las tuberías de drenaje del Area Piloto Chacupe, se puede deducir que material fino del relleno también se ha acumulado en la manta de grava contribuyendo al aumento de la resistencia de entrada.

7. Desalinización y desodificación

7.1 Generalidades

La recuperación de suelos salino-sódicos consiste en disminuir la concentración de sales y del sodio intercambiable a niveles que sean tolerables por la mayoría de los cultivos. La disminución de la concentración total de sales se realiza mediante un proceso de lavado y la reducción en el contenido de sodio intercambiable mediante el reemplazo natural de este por el calcio presente en el suelo. Si los análisis prueban que el calcio disponible en el suelo no es suficiente, es necesario una aplicación de enmiendas químicas. Cuando el origen de la salinización del suelo se debe a un nivel freático elevado, es necesario primeramente deprimirlo mediante la instalación de un sistema de drenaje. En caso contrario, no podrá efectuarse un mejoramiento eficiente del suelo, porque la aplicación del agua solamente conseguirá disminuir temporalmente la concentración de sales en la capa superficial, pero no su eliminación del perfil del suelo.

El origen de la salinidad de los suelos del área piloto está ligado a un alto nivel freático. Es por eso que se instaló el sistema de drenaje anteriormente descrito y posteriormente se realizó el lavado de suelos.

El período de lavado de la primera etapa fué muy breve, teniendo en cuenta la gran cantidad de sales que se había en el perfil del suelo. Como cultivo que ayuda en la recuperación de los suelos se implantó el arroz. En la segunda etapa, el lavado de suelos ha sido más prolongado e intensivo en lo que se refiere al volumen de agua aplicado, antes de implantar el cultivo de arroz.

El proceso de desalinización del suelo ha sido estudiado en forma detallada en una zona de la primera etapa del área piloto (ver Plano 2). Con respecto a la segunda etapa se asignó la desalinización en algunas pozas que presentaban diferencias marcadas en la textura de su perfil.

En la zona de estudios de desalinización y desodificación se aplicó en la primera etapa 8 t/ha de yeso. En la segunda etapa no se aplicó enmiendas químicas.

Una disminución del contenido de sales en el suelo está relacionado muchas veces con la lámina del agua de riego aplicada. Sin embargo, el suelo se lava solamente por una fracción de la lámina de agua aplicada que logra infiltrarse; el resto se pierde por evaporación o escorrentía superficial. Para entender mejor el proceso de desalinización, entonces es necesario medir o calcular la cantidad de agua que se infiltra en el suelo y percola a través del perfil mismo. Con este fin se elaboró un balance de agua.

7.2 El balance de agua

Para desarrollar un balance de agua es necesario delimitar la zona en estudio. En el plano horizontal, el límite está dado por los extremos de las pozas de riego donde se efectuó el estudio de la desalinización (ver Plano 2), y en el plano vertical, el límite inferior está dado por el nivel de los drenes y el límite superior por el nivel del terreno. La superficie bruta del área en la cual ha sido desarrollado el balance de agua fué de 4,942 ha. La ecuación para el balance de agua es:

$$P + I + F_i = E_s + E_t + D + A \quad (4)$$

donde

P = precipitación

I = irrigación

F_i = flujo subterráneo que ingresa al área

E_s = escorrentía superficial

E_t = evapotranspiración

D = agua drenada por el sistema de drenaje, y

A = cambio de almacenamiento de agua en el suelo.

Los términos de la Ec.(4) pueden ser expresados en base a volumen (m^3) o en base a una lámina de agua (mm). Sin embargo, cuando se expresan en base a una lámina, todos los términos deben ser calculados con relación a una misma superficie.

El balance de agua durante el período de experimentación se dividió por etapas:

- el lavado	61 días
- la primera campaña 70/71	144 días
- el barbecho de 1971	198 días
- la segunda campaña 71/72	147 días
- el barbecho de 1972	198 días
- la tercera campaña 72/73	116 días
- el barbecho de 1973	260 días

Para dar un ejemplo del cálculo del balance de agua se escogió la segunda campaña 71/72 y el barbecho de 1972.

7.2.1 El balance de agua de la campaña de arroz 1971/1972

La segunda campaña de arroz se realizó entre el 26 de Diciembre de 1971 y el 20 de Mayo de 1972 y tuvo una duración de 147 días. Los valores de cada uno de

los términos de la Ec.(4) y su determinación son presentadas a continuación. La precipitación P, registrada en la Estación Meteorológica de Lambayeque, fué de una lámina de 74 mm, y representa un volumen de unos 3,600 m³.

La aplicación de riego I, ha sido de 83,100 m³, que es una lámina de 1,682 mm. El flujo subterráneo F₁, que ingresa al área es un factor que no se puede medir directamente cuando el área está bajo riego permanente, como es el caso del cultivo de arroz. Sin embargo, cuando el riego no es permanente sino intermitente, como sucede con otros cultivos diferentes al arroz o también durante un proceso de lavado intermitente, es posible determinar el flujo subterráneo que ingresa al área mediante la preparación de hidrogramas de descarga. Para el caso del lavado, algunas hidrogramas han sido preparados por ALVA (1971). Durante la segunda campaña de arroz realizada en la primera etapa del Area Piloto Chacupe, se había concluido la instalación del sistema de drenaje en la segunda etapa. Sin embargo, quedaba para construir la infraestructura de riego, razón por la cual los terrenos no tuvieron riegos. Por ser las condiciones del subsuelo similares en las dos etapas, se ha supuesto que el flujo subterráneo que ingresó en la zona de estudio ha sido semejante al que ingresó en la segunda etapa en el mismo período. Bajo dichas condiciones es válida la siguiente ecuación:

$$x_1/y_1 = x_2/y_2 \quad (5)$$

donde

- x₁ = el flujo subterráneo en l/seg que ingresa al área de estudio
- y₁ = la superficie del área de estudio
- x₂ = el flujo subterráneo en l/seg que ingresó en la segunda etapa
- y₂ = la superficie de la segunda etapa.

Con los factores y₁ = 4.9 ha, x₂ = 3.0¹ l/seg, y y₂ = 14.8 ha, el flujo subterráneo que ingresó en el área de estudio x₁ = 1.0 l/seg. Por lo tanto, el volumen del flujo subterráneo, que ingresó al área de estudio durante la segunda campaña de arroz, fué de unos 12,600 m³, lo que corresponde a una lámina de 1.7 mm/día.

La escorrentía superficial, E_e, es el agua desalojada de las pozas de riego cuando la concentración de sales ha aumentado excesivamente. Esto es debido a la disolución de las sales de la capa superficial sumado al efecto de la evaporación.

¹ Corregido por el efecto del colector (OOSTERBAAN, 1975)

Esta práctica se aplicó solamente durante las primeras semanas después del transplante del arroz. También se ha incluido en este término las pérdidas de agua por rotura de bordos de las pozas. El volumen total de agua perdida como escorrentía superficial fué de $10,600 \text{ m}^3$, o sea de 1.5 mm/día .

El agua de drenaje, D, es el agua evacuada por los drenes entubados de campo (drenes 1 al 6, ver Plano 2) y suma un volumen de $24,200 \text{ m}^3$, o sea 3.3 mm/día . Hay que agregar el agua evacuada directamente hacia el colector, cantidad desconocida. Fué estimada (OOSTERBAAN, 1975) en 24% de la cantidad evacuada por los drenes de campo y es equivalente a un volumen de $5,800 \text{ m}^3$. Por lo tanto el drenaje total es igual a $30,000 \text{ m}^3$, o sea 4.1 mm/día .

El cambio de almacenamiento de agua en el suelo, A, es la suma del cambio en el volumen de agua retenida en el suelo en la zona por encima del nivel freático (zona no saturada) y por debajo de éste (zona saturada). Con fines explicativos se calculó éste término, ya que por su magnitud con respecto a los demás términos del balance puede considerarse insignificante. Solamente es importante calcularlo cuando el suelo es regado después de un tiempo largo sin cultivos, como fué el caso del período de lavado.

El cambio en el almacenamiento de agua por debajo del nivel freático, se debe a un cambio en la profundidad de éste multiplicando por la porosidad drenable. El cambio del volumen de agua almacenado por encima del nivel freático fué considerado cero por ser el suelo regado fuertemente para la preparación del terreno antes del transplante. La porosidad drenable ha sido estimada (ALVA, 1971) con el método de la descarga de drenes versus el cambio en altura del nivel freático. Fué estimada en 8% en volumen. Durante la campaña de arroz el nivel freático ha subido 10.9 cm en promedio, lo que resulta en un volumen de agua almacenado de unos 400 m^3 .

La evapotranspiración, E_t , se calculó con el balance de agua, la Ec.(4) como único desconocido. Con los demás términos conocidos, se obtiene un volumen de agua evapotranspirado de $58,300 \text{ m}^3$, o sea $11,800 \text{ m}^3/\text{ha}$, igual a $1,180 \text{ mm}$ durante 147 días con una evapotranspiración promedio de 8.0 mm/día . Este valor es mayor que la evapotranspiración medida en el tanque "Clase A" que fué de 5.8 mm/día . Es también mayor que la evapotranspiración potencial calculada con la fórmula de PENMAN (VAN BEERS, 1967) a partir de datos climatológicos de la Estación Meteorológica de Lambayque, que fué de 6.2 mm/día .

7.2.2 El balance de agua en el barbecho de 1972

Como inicio del barbecho de 1972 se ha considerado el 21 de Mayo y se terminó al iniciarse la campaña de 1972-1973. El transplante para esta campaña tuvo lugar el 5 de Diciembre, por lo tanto la duración del barbecho durante el año 1972 ha sido de 198 días.

Los valores de cada uno de los términos del balance de agua y su determinación es la siguiente.

La precipitación, P, registrada en la Estación Meteorológico de Lambayque fué cero.

La aplicación de riego, I, ha sido de $17,900 \text{ m}^3$. Esta cantidad de agua se aplicó mayormente en el último mes de barbecho para remojar el suelo con fines de preparación del terreno para la próxima campaña. Durante el barbecho normalmente hay poca disponibilidad de agua para lavar el suelo.

CUADRO 7. FLUJO SUBTERRANEO H, QUE INGRESA AL AREA DE ESTUDIO (l/seg)

Mes	Lavado de 1970	Barbecho de 1971	Barbecho de 1972	Barbecho de 1972 a partir de la 2da etapa
Mayo			1.11	0.80
Junio		1.03	1.08	0.64
Julio		0.51	0.62	0.61
Agosto		0.68	0.49	0.52
Setiembre		0.42	0.16	0.45
Octubre		0.20	0.39	0.40
Noviembre	0.65	0.48	0.48	0.60
Diciembre	0.65			0.67

El flujo subterráneo, F_i , que ingresa al área de estudio se ha calculado a partir de las escargas de los drenes de campo (Cuadro 7). En este Cuadro se puede observar la descarga del sistema de drenaje entubado (drenes 1 al 6) en l/seg para el barbecho de 1972. Esos datos son corregidos por el cambio en el almacenamiento del agua en la zona saturada. Con fines de comparación se ha dado también datos de los drenes 1 al 6 para el barbecho de 1971, datos obtenidos a partir de los registros de la descarga del sistema de drenaje de la segunda etapa, empleando Ec.(5) y datos obtenidos durante el lavado (ALVA, 1971).

Tomando en cuenta el efecto del colector, lo que se estima en 14%, el volumen total de agua que ingresa subterráneamente al área es de $10,900 \text{ m}^3$. Esto corresponde a una lámina de 1.1 mm/día.

El agua evacuada por los drenes entubados de campo, D, suma un volumen de $15,200 \text{ m}^3$. Hay que agregar el agua evacuada directamente hacia el colector, cantidad que fué estimada para esta época en 14% del volumen de agua evacuado por los drenes 1 al 6 y equivale a un volumen de $2,100 \text{ m}^3$. Por lo tanto, el drenaje total es igual a $17,300 \text{ m}^3$.

El cambio en el almacenamiento de agua en el suelo, A, consiste, como ha sido expuesto anteriormente (ver Cap.7.2.1), de dos factores: el volumen de agua retenido en el suelo por encima del nivel freático y por debajo de este.

Durante el barbecho el volumen de agua retenido en el suelo en la zona no saturada ha disminuido gradualmente por efecto de la evaporación. Sin embargo, al momento de iniciarse el barbecho el suelo estaba recién regado (campana anterior de arroz) y al final del mismo se aplicó un riego pesado para la preparación del terreno. Por tal motivo, se ha considerado que no hubo cambio alguno en el almacenamiento del agua en la zona no saturada. El cambio del volumen de agua almacenada por debajo del nivel freático ha sido calculado a partir del cambio en la altura del nivel freático multiplicado por la porosidad drenable. Así se llegó a un volumen de -200 m^3 . El signo negativo significa que el suelo ha perdido agua porque el nivel freático bajó.

La evapotranspiración, E, ha sido calculado con la Ec.(4), en este caso ha sido la suma de la evapotranspiración del cultivo de arroz en proceso de maduración y luego la evaporación del suelo en barbecho. En total fué de $11,700 \text{ m}^3$ en 4,942 ha, o sea una lámina de 237 mm en 198 días (1.2 mm/día).

7.2.3 Percolación e infiltración

El agua que se infiltra y luego percola a través del perfil de suelo hasta llegar al nivel freático, es lo que contribuye realmente al proceso de desalinización. Sin embargo, la parte del agua que se infiltra al suelo y que posteriormente se pierde por evapotranspiración o que permanece almacenada en el suelo, contribuye al movimiento de sales dentro del perfil más no al proceso de desalinización.

Bajo un régimen de riego permanente como ocurre durante el cultivo de arroz, se puede considerar la infiltración aproximadamente igual a la percolación. Sin embargo, bajo un régimen de riego intermitente, la infiltración y la percolación no son iguales; en este caso la infiltración es mayor a la percolación.

La percolación se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Perc} = P + I - E_s - E_t \quad (6)$$

(ver explicación de términos: Ec.(4), Cap.7.2) o combinada Ec.(4) y (6):

$$\text{Perc} = D - F_i + A \quad (7)$$

Para la campaña de arroz 1971-1972, la percolación a través del perfil del suelo en total fué de 17,800 m³, volumen que corresponde a una lámina de agua percolada de 360 mm en 147 días. Para el barbecho de 1972 la percolación a través del perfil de suelo fué de 6,200 m³, o sea una lámina de 126 mm.

7.2.4 Resumen del balance de agua del experimento

Un resumen de los diferentes términos del balance de agua, elaborados en la forma expuesta, para las diferentes campañas de arroz, las épocas de barbecho y el lavado, es presentado en Cuadro 8.

CUADRO 8. BALANCE DE AGUA (SUPERFICIE DE ESTUDIO DE 4,942 ha)

Términos de la Ec.(4)	Lavado	Campaña 1970-71	Barbecho de 1971	Campaña 1971-72	Barbecho de 1972	Campaña 1972-73	Barbecho de 1973
Duración (días)	61	144	198	147	198	116	260
P (en 100 m ³)	0	25	0	36	0	20	0
I (en 100 m ³)	221	577	145	831	179	886	438
F _i (en 100 m ³)	39	139	104	126	109	92	134
E _s (en 100 m ³)	2	63	0	106	0	194	0
D (en 100 m ³)	97	345	185	300	173	232	237
A (en 100 m ³) en zona saturada	6	3	- 8	4	- 2	3	9
A (en 100 m ³) en zona no saturada	62	0	0	0	0	0	0
E _t (en 100 m ³)	93	330	72	583	117	569	326
E _t (en mm)	188	668	146	1,180	237	1,151	660
E _t (en mm/día)	3.1	4.6	0.7	8.0	1.2	9.9	2.5
Percolación (en 100 m ³)	64	209	73	178	62	143	112
Percolación (en mm)	130	423	148	360	126	289	227

7.3 Desalinización

Durante el lavado seguido por tres campañas de arroz se ha aplicado un volumen total de 335,800 m³ de agua (incluyendo la precipitación) en el área de estudio que representa una lámina total de 6,800 mm, para la época mencionada, el barbecho de 1973 inclusive. De esta lámina ha percolado a través de perfil de suelo el 25%, es decir una lámina de 1,700 mm (ver Cuadro 8).

La salinidad en el suelo ha sido medido en varios momentos durante el proceso de la desalinización. Los resultados se muestran en el Cuadro 9.

CUADRO 9. EL DESARROLLO DE LA CE DEL EXTRACTO DE SATURACIÓN DESDE EL ESTADO INICIAL HASTA LA TERCERA CAMPANA DE ARROZ INCLUSIVE

Profundidad (cm)	CE _e (mmhos/cm a 25 °C)					
	Estado inicial	Después lavado	Después prim. campaña	Antes seg. campaña	Después seg. campaña	Después terc. campaña
0 - 10	169.0	34.0	20.1	17.7	16.9	
10 - 20	130.0	45.2	22.1	19.6	15.9	12.1 ¹
20 - 40	75.1	54.0	31.5	24.0	21.2	16.1
40 - 60	42.2	46.6	33.4	28.4	26.4	20.7
60 - 80	33.8	42.2	35.5	31.0	29.0	22.7
80 - 100	30.2	40.9	36.5	29.7	30.4	24.2
100 - 120	26.5	34.5	35.0		27.5	22.7
120 - 160	23.3	30.9	29.4		24.3	21.5
160 - 200	18.9	29.0	22.4		19.5	18.4
200 - 240	19.1		21.2		16.6	17.4

¹ Valor que corresponde a la capa entre 0 en 20 cm

Graficando la salinidad del suelo por medio de la CE_e versus la profundidad, se obtiene una visión más clara como se desarrolla el proceso de desalinización (ver Fig.6). El estado inicial del suelo es el ejemplo típico de la salinización a partir de un nivel freático a poca profundidad y bajo un régimen climático árido. El nivel de la salinidad a través de todo el perfil es muy alto. Al iniciarse el lavado, rápidamente disminuye la salinidad en las capas superficiales, pero aumenta en las capas más profundas. Después del lavado la mayor concentración de sales se encontró en la capa entre 20 y 40 cm. Después de tres campañas de arroz, la capa con mayor concentración está a la profundidad entre 60 y 100 cm. La salinidad a partir de la profundidad de 140 cm, casi no ha cambiado desde el inicio. En la Figura 7 se ha graficado la curva de desalinización del suelo en forma fraccionada, es decir el descenso de la salinidad ocurrido en relación al que tenía en su estado inicial versus la lámina de per-

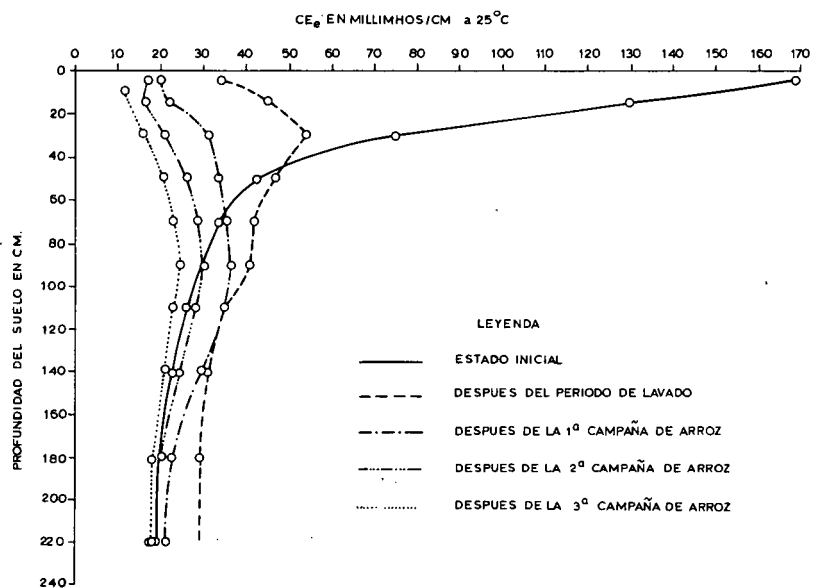


Fig. 6. Proceso de desalinización.

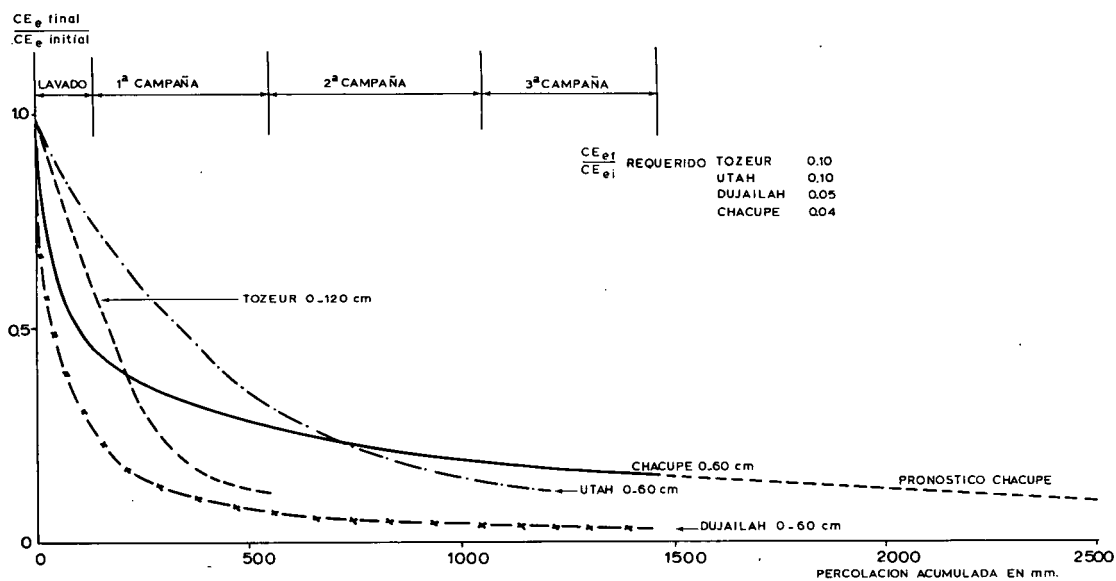


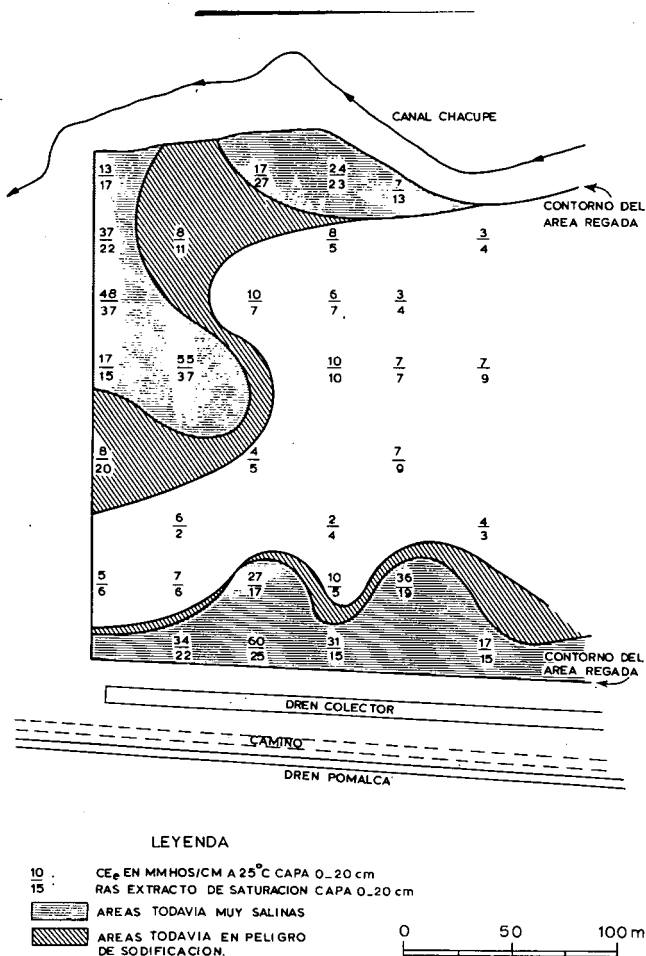
Fig. 7. Curva de desalinización.

colación acumulada. Se puede observar que la salinidad ha disminuído rápidamente durante el lavado. Sin embargo, posteriormente durante las campañas de arroz la desalinización ha sido mucho más lenta. Con fines de comparación se ha incluido en la misma figura (Fig.7) las curvas de desalinización de algunos otros experimentos en:

Dujailah, Irak, en un suelo FrL (DIELEMAN, 1963),
Utah, EE.UU., en un suelo FrL (REEVE, según RICHARDS, 1954), y
Tozeur, Tunez, en un suelo FrA con alto contenido de yeso (UNESCO, 1970).

Inicialmente la reducción de la salinidad es más pronunciada en los suelos de Chacupe y de Dujailah. En estos dos experimentos la salinidad inicial ha sido muy alta. La CE_e fluctuaba entre 50 y 100 mmhos/cm mientras que en Utah y Tozeur entre 30 y 40 mmhos/cm. Un factor importante, que determinó la velocidad del proceso de desalinización en el Area Piloto Chacupe fué la distribución, tamaño y tortuosidad de los poros. Al iniciarse el lavado en Chacupe, el suelo tenía grietas grandes entre los elementos estructurales. Sin embargo, después del lavado inicial estas grietas habían desaparecido (el suelo contiene arcilla del tipo montmorillonítico) y una gran parte de la porosidad estuvo ocupado por poros muy finos a través de los cuales el paso de agua es muy lento y restringido, en consecuencia la desalinización procedió lentamente (van ALPHEN, 1975).

Extrapolando la curva de desalinización en la Figura 7 es posible profetizar sobre el futuro desarrollo del proceso de desalinización en el Area Piloto Chacupe. Después de la percolación de 2,500 mm, la relación CE_{ef}/CE_{ei} (relación del valor final y inicial de la conductividad eléctrica medida en el extracto de saturación) en la capa de 0 a 60 cm de profundidad será 0.10, valor que corresponde a una CE_e de 8.0 mmhos/cm. Este valor de CE todavía es tan elevado que será dudoso el éxito cuando se siembren cultivos de la zona (alfalfa, maíz, sorgo). Para llegar a una percolación de 2,500 mm, por lo menos se requiere tres campañas de arroz más. Sin embargo es posible acelerar el proceso de desalinización cuando se intensifique el lavado durante el barbecho. Es conocido que un lavado bajo régimen de riego intermitente es más efectivo: un volumen de agua aplicada en forma intermitente y dejando secar el suelo entre las aplicaciones de agua de riego, disuelve más sales que cuando se aplica el mismo volumen de agua bajo un régimen de riego permanente (inundación). Tratando de suelos pesados, esto se atribuye a la formación de grietas, cuando se seca el perfil. Las sales probablemente son transportados con la humedad del suelo en sentido lateral (diferencia en potencial), es decir desde el centro de los elementos estructurales hacia las grietas, donde evapora el agua, dando origen a un aumento en la con-



Plano 3. Estado de recuperación después de la segunda campaña de arroz.

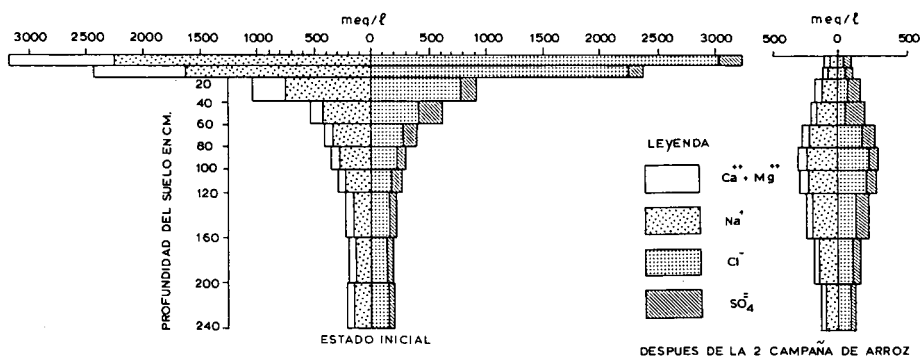


Fig.8. Composición iónica en el extracto de saturación a lo largo del perfil del suelo.

centración de sales. En la siguiente aplicación el agua rápidamente se percolará por las ranuras disolviendo las sales (van ALPHEN, 1975).

En el Cuadro 9 se ha mostrado la CE_e promedio; sin embargo hay mucha variación dentro de las muestras. Existen zonas donde la recuperación ha sido más rápida (ver Plano 3). Esto se debe parcialmente a una salinidad inicial menos elevada, pero también debe haber tenido influencia las pequeñas diferencias en las características físicas del suelo, sobre todo las que determinan la infiltración.

En la Figura 8 puede observarse que inicialmente el catión y anión predominante son el Na y el Cl. Durante el proceso de desalinización la concentración de los iones Na^{+1} , Ca^{+2} , Cl^{-1} y SO_4^{-2} disminuyó, pero la reducción en la concentración del Na-ion y Cl-ion fué mucho más marcada. No se ha graficado la concentración del HCO_3 -ion y del CO_3 -ion. El anión CO_3^{-2} no estuvo presente en el suelo; la concentración del anión HCO_3^{-1} fué del orden de 1 a 2 meq/l en el estado inicial y 2 a 4 meq/l después de la segunda campaña de arroz.

7.4 Desodificación

El suelo inicialmente fué muy salino y el contenido de sodio intercambiable muy elevado. Por tal motivo se ha aplicado yeso antes de iniciar el lavado. El requerimiento de yeso ha sido estimado en 16 t/ha, tomando en cuenta que

- durante los primeros años de la recuperación el cultivo sería arroz,
- el arroz es resistente a un nivel elevado del Na intercambiable (PEARSON, 1960),
- el arroz no es sensible a los efectos negativos de una estructura deteriorada del suelo, y
- el suelo además del yeso, contiene carbonato de calcio que aunque sea casi insoluble a largo plazo, ayudará a disminuir el nivel del sodio intercambiable.

Se decidió aplicar solamente 8 t/ha, en la zona de los estudios de la desalinización y desodificación, lo que fué incorporado en una capa superficial de 8 cm de profundidad.

El proceso de desodificación o sodificación puede analizarse con los siguientes datos:

- la cantidad del Na intercambiable o el valor PSI,
- la relación de adsorción de sodio, es decir el valor RAS, del extracto de saturación,

- el valor pH, y
- el contenido de los aniones CO_3^{-2} y/o HCO_3^{-1} en el extracto de saturación.

El sodio intercambiable ha sido determinado directamente, pero su análisis en suelos muy salinos es tan inexacto que hace dudoso la interpretación de los datos (ver Anexo 1). Una medición indirecto del grado de sodificación se hace con el valor RAS del extracto de saturación, porque existe una relación entre la composición química de la solución del suelo y la del complejo de cambio. Por ser la composición química de la solución del suelo semejante a la del extracto de saturación, con la última podemos estimar la composición química del complejo de cambio y de esta manera la cantidad del sodio intercambiable.

La teoría que describe la relación entre la composición química de la solución del suelo y la del complejo de adsorción es complicada. Sin embargo en forma simple esta relación, para un sistema heterovalente está dada por la ecuación de GAPON:

$$\gamma^+ / \gamma^{++} = K_g \frac{c_o^+}{\sqrt{(\frac{1}{2}c_o^{++})}} \quad (8)$$

donde

γ^+ = la fracción del catión monovalente adsorbido,

γ^{++} = la fracción del catión divalente adsorbido,

c_o^+ = la concentración en la solución del suelo del catión monovalente en la meq/l

c_o^{++} = la concentración en la solución del suelo del catión divalente en meq/l

K_g = un constante de preferencia.

El factor K_g depende de los cationes en cuestión, el tipo de arcilla y la presencia de materia orgánica. Para un sistema en donde intervienen en el proceso de intercambio los cationes Na, Ca y Mg, RICHARDS (1954) empíricamente encontró un valor de $K_g = 0.01475$. Se debe anotar que esta relación es precisa cuando el PSI es menor a 50, pero menos exacto cuando es mayor.

En el caso mencionado por RICHARDS (1954), el tipo de arcilla que predomina es la illita. Los suelos de Chacupe contienen además de la illita la montmorillonita (Cap.3.5) por lo que se puede suponer que la relación desarrollada por RICHARDS (1954) no es válida para los suelos de Chacupe.

Experimentos de laboratorio en donde se ha equilibrado muestras de suelo de Chacupe con soluciones de diferentes valores de RAS, han revelado una relación RAS-PSI (ver Fig.9) ligeramente distinta de la que encontró RICHARDS (1954).

Los datos sobre el desarrollo del proceso de desodificación se muestra en el Cuadro 10 en el cual se puede observar que desde el inicio de la recuperación hasta la primera campaña de arroz inclusive, el valor RAS del extracto de saturación se ha reducido significativamente en las capas superficiales y aumentó en las capas más profundas. Durante la segunda y tercera campaña el valor RAS disminuyó gradualmente en todo el perfil del suelo.

CUADRO 10. VALORES DE LA RELACION DE ADSORCION DE SODIO (RAS) EN EL EXTRACTO DE SATURACION Y EL pH (1:1) DURANTE EL PROCESO DE DESODIFICACION

Profundidad (cm)	Estado inicial		Después la prim. campaña		Después la seg. campaña		Después la ter. campaña	
	pH	RAS	pH	RAS	pH	RAS	pH ¹	RAS
0 - 10	7.4	90	7.8	25	7.3	13		
10 - 20	7.5	85	7.9	29	7.5	17	7.3	14 ²
20 - 40	7.8	73	7.9	40	7.7	28	7.6	24
40 - 60	8.0	57	8.0	48	7.7	38	7.5	33
60 - 80	8.1	52	7.9	54	7.6	45	7.5	35
80 - 100	8.1	46	7.8	53	7.6	47	7.5	39
100 - 120	8.0	38	7.8	52	7.5	47	7.5	36
120 - 160	7.9	35	7.8	49	7.6	43	7.4	34
160 - 200	7.9	28	8.0	37	7.7	35	7.4	29
200 - 240	8.0	29	7.9	30	7.7	30	7.4	28

¹ pH determinado en la pasta de saturación

² El valor corresponde a la capa 0 - 20 cm de profundidad

El valor de pH no ha cambiado: se mantiene alrededor de 7.5. Existe concordancia de los valores de pH encontrados y la ausencia del anión CO_3 en el extracto de saturación. Además, la concentración del anión HCO_3 está dentro de los límites normales para un suelo cultivado. Tanto los valores RAS del extracto de saturación, como el pH y la concentración de los aniones HCO_3 y CO_3 en el extracto muestran que el suelo está en un proceso de desodificación. Sin embargo, el ritmo de este proceso tiende a disminuir.

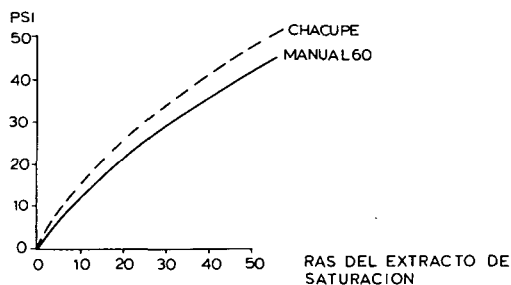


Fig. 9. Relación RAS-PSI.

Según la relación PSI-RAS establecida para los suelos de Chacupe (ver Fig. 9) el porcentaje del sodio intercambiable después de la tercera campaña de arroz es de 20%. Es difícil pronosticar hasta que nivel se reducirá el PSI. El suelo todavía,

aparentemente, contiene yeso¹, entre 0.2 y 0.6% en las capas de 0 a 60 cm de profundidad. Por tal motivo no se ha considerado necesario aplicar más yeso a otro mejorador químico.

La experiencia sobre el desarrollo de la desodificación en la segunda etapa es distinta. Bajo condiciones normales el yeso es poco soluble, siendo su solubilidad aproximadamente 35 meq/l. Sin embargo, en presencia de NaCl, y como esta sal se presenta en los suelos del Area Piloto Chacupe en una concentración elevada, la solubilidad del yeso aumenta llegando a unos 100 meq/l. Este aumento en la solubilidad podría implicar que parte del yeso es lavado hacia capas más profundas haciendo poco eficaz la aplicación del yeso. Este fenómeno del lavado del yeso fue notorio en la primera etapa, motivo por el cual en la segunda etapa se decidió no aplicar el yeso antes el inicio del lavado.

Los primeros resultados en la segunda etapa indican que el valor RAS tiende a subir ligeramente luego de una disminución inicial muy satisfactoria. El momento en que el valor RAS no disminuye más, corresponde más o menos con el momento en que el contenido inicial de yeso ha reducido a cero. El pH se mantiene entre 7.4 y 7.6.

7.5 Aplicación de enmiendas químicas

En una parte del Area Piloto Chacupe se efectuó un experimento con enmiendas químicas aplicadas en diferentes dosis y métodos de distribución. Se aplicó el yeso en dosis de 4, 8, 12 y 16 t/ha. Las formas de aplicación fueron: disuelto en el agua de riego, distribuido sobre la superficie del suelo e incorporado superficialmente. Además se aplicó azufre al suelo en 2 dosis: 0.7 y 1.4 t/ha.

Con respecto al método de distribución se llegó a la conclusión que

- la aplicación de yeso en el agua de riego no es efectiva, porque una cantidad considerable del yeso se precipitó en el fondo del canal de riego;
- la aplicación de yeso superficialmente no es recomendable debido a los fuertes vientos que se presentan durante el día, ocasionando pérdidas hasta 50% de la dosis aplicada al ser transportado fuera del campo. Además el yeso en la superficie es arrastrado por el frente de riego, desuniformizando la aplicación;
- la forma de aplicación que ha dado mejores resultados es la incorporación superficial del yeso (5 a 10 cm de profundidad).

Con respecto a la dosis de enmienda química aplicada se llegó a ningún resultado concreto. Como unidad de investigación de un tratamiento se tomó una poza de riego (1,000 - 2,000 m²). Sin embargo, dentro de cada tratamiento resultó muy

¹ Debe ser anotado que los datos de los análisis del yeso no son muy confiables (ver Anexo 1).

grande la variación en el grado de sodificación y el contenido de yeso inicial. Además los resultados de los análisis tanto del yeso como del sodio intercambiable en suelos muy salinos son inexactos (ver Anexo 1).

Por estas razones no ha sido posible interpretar los resultados del estudio de enmiendas químicas. Si se hubiera desarrollado los experimentos en pozas de 1 m², los resultados probablemente hubieran sido más concluyentes. Sin embargo, la aplicación práctica de tales resultados en un proceso de recuperación de suelos salino-sódicos es dudosa, debido a la gran variación en el contenido inicial de yeso y el sodio intercambiable, variación que es muy común en suelos salino-sódicos.

7.6 Desarrollo de las características físicas del suelo

Las características físicas medidas en el área de estudio son la retención de humedad (curva de pF) y la infiltración.

Se tomaron muestras de pF al inicio del lavado y después de la primera campaña. En el Cuadro 11 se muestran los valores promedios encontrados en las capas de 0 - 20 cm y de 20 - 90 cm aproximadamente, que representan las capas superficiales en los suelos de la zona, con textura FrAr a Ar.

CUADRO 11. RETENCION DE HUMEDAD EN % DE VOLUMEN ANTES DEL LAVADO Y DESPUES DE LA PRIMERA CAMPANA DE ARROZ

Profundidad y fecha del muestreo	pF							
	0.4	1.0	1.5	2.0	2.3	2.7	3.4	4.2
Capa 0 - 20 cm								
Antes lavado	48.6	47.2	44.0	39.3	38.5	35.1	29.4	24.9
Después prim. campaña	44.9	44.7	44.2	41.4	40.4	38.2	36.5	25.1
Capa 20-90 cm								
Antes lavado	44.0	43.4	42.7	40.2	39.5	37.2	35.1	27.9
Después prim. campaña	44.3	44.1	43.9	43.0	42.4	40.5	38.2	27.0

Se encontró entre las capas de 0 - 20 cm y de 20 - 90 cm de profundidad una diferencia en el grado de estructuración del suelo. En la capa de 0 - 20 cm se encontró una estructura moderada a fuertemente desarrollada, mientras que la estructura en la capa de 20 - 90 cm se presentó débilmente desarrollada o macizo.

En el Cuadro 11 se puede observar una tendencia de disminución del volumen total de los poros grandes (pF: 0.4 - 2.0) en las capas de 0 - 20 cm y de 20 - 90 cm de profundidad. Esto implica que la aeración, cuando está a capacidad de campo, ha disminuído sustancialmente. Pruebas de campo llevadas a cabo durante el barbecho, indican que aún 6 días después de haberse infiltrado el agua de riego, la humedad encontrada en las capas mencionadas corresponde a un valor pF = 1.5. La aeración en este caso fué menor a 1% del volumen, considerado como un valor muy bajo para cualquier cultivo que no sea arroz.

La cantidad total de agua disponible para la planta (ver definición Cap.3.3) no ha cambiado sustancialmente. Sin embargo después de la primera campaña aumentó la cantidad de agua retenida en los poros más finos en el rango de pF 3.4 a 4.2, o sea el agua no fácilmente disponible para la planta.

La infiltración cuyos datos se muestran en el Cuadro 12, en las campañas de arroz, se ha determinado a partir del balance de agua (ver Cap.7.2). La infiltración durante el lavado y los barbechos también se ha calculado mediante un balance de agua, pero durante el intervalo de un solo riego. Estos últimos datos son menos exactos.

CUADRO 12. INFILTRACION EN mm/día

Lavado 1970	4.5
Campana 1970/71	2.9
Barbecho 1971	4.1-4.7
Campana 1971/72	2.5
Barbecho 1972	3.9
Campana 1972/73	2.5

Se puede observar que la infiltración en el barbecho es algo más que durante las campañas de arroz. El suelo durante el barbecho está seco y agrietado. No se puede notar una diferencia marcada en la infiltración media durante las tres campañas de arroz.

7.7 Comentario final sobre la recuperación

En el Area Piloto Chacupe, tanto el proceso de desalinización, como la desodificación se están desarrollando lentamente. Es una indicación que la eficiencia de lavado es bastante reducida. Esto se debe principalmente a la baja infiltración y percolación. Es posible aumentar el volumen de agua infiltrada cuando se aplica agua no solamente durante el cultivo de arroz en forma de inundación, sino además durante el barbecho en riegos fuertes cada 6 a 8 semanas. El riego intermitente tiene una ventaja sobre el riego por inundación: la eficiencia de lavado

del primer método es más alta. También hay que realizar ciertas prácticas agronómicas, como el subsolado.

De los resultados de los análisis químicos (ver los Cuadros 9 y 10) se puede concluir que los suelos del Area Piloto Chacupe están en proceso de desalinización y desodificación. Sin embargo, desde el punto de vista de algunas características físicas del suelo, se observa un cierto grado de degradación de la estructura del suelo. Esta degradación probablemente se debe a un proceso físico-químico que se desarrolla en el suelo, en lo cual el sodio intercambiable es un factor importante. En la capa superficial, la degradación de la estructura se debe también al manejo del suelo con el cultivo de arroz.

Para eliminar el efecto del sodio en el complejo de cambio, es necesario la aplicación de ciertas enmiendas químicas, p.e. el yeso. En presencia del NaCl en el suelo, aumenta la solubilidad del yeso. Para evitar que parte del yeso aplicado se pierda hacia capas más profundas, se recomienda postergar su aplicación hasta que la salinidad (y el contenido de NaCl) en la capa superficial se haya reducido algo. Bajo las condiciones del Area Piloto Chacupe, una aplicación de yeso será conveniente entre 6 y 9 meses después del inicio del lavado. La lámina de agua aplicada en esta fase inicial en el caso del Area Piloto Chacupe es en el orden de 1,500 mm.

El lavado de un suelo salino puede tardar mucho. Para llegar a una recuperación completa existen dos alternativas:

- lavar el suelo hasta un nivel de salinidad tan bajo, que sea posible implantar una gran diversidad de cultivos, o

- un lavado inicial y luego implantar un cultivo que tolera una salinidad alta en combinación con una aplicación de agua en exceso a la necesidad del cultivo. Un cultivo muy apropiado para este fin es el arroz.

En muchas circunstancias la segunda alternativa será la más atractiva, como en el caso de condiciones de salinidad excesiva, suelo pesado o parte del año una escasez de agua.

Dentro de un proyecto de recuperación, el problema será determinar cual es el momento más apropiado para iniciar el cultivo de arroz o seguir lavando el suelo sin cultivo. Es un problema complejo, pues depende de varios factores, entre ellos la salinidad del suelo, el clima, la disponibilidad de agua, etc. El clima en la zona de Chacupe permite el cultivo de arroz solamente en los meses de verano (Octubre-Mayo). Durante esta época hay normalmente suficiente disponibi-

lidad de agua, pero ésta es escasa durante el resto del año y no estará disponible con fines de lavado exclusivamente. Una solución a éste problema podría ser lavar el suelo cuando haya disponibilidad de agua, hasta un nivel de salinidad tal que el suelo permita el cultivo de arroz con una producción suficiente para tener ingresos mínimos. Esa producción para la zona de Chacupe es de unos 3,000 kg/ha, lo que corresponde a una CE_e promedio en la capa 0 - 20 cm, de profundidad de 20 - 25 mmhos/cm a 25 °C.

8. Algunos datos sobre los costos de recuperación

8.1 Generalidades

Los costos de recuperación incluyen los siguientes aspectos:

- costos del sistema de drenaje,
- costos del sistema de riego, sea la remodelación del sistema actual o la construcción del nuevo sistema de riego,
- costos de la preparación del terreno, y
- costos del proceso de lavado y aplicación de enmiendas químicas.

En vista que el área piloto fué diseñado para investigaciones en drenaje y mejoramiento de suelos salino-sódicos, se tratará solamente sobre los costos del sistema de drenaje, proceso de lavado y aplicación de enmiendas químicas.

8.2 Costos del sistema de drenaje

Un sistema de drenaje está compuesto de los siguientes elementos:

- un sistema de drenaje principal, incluyendo colectores, estructuras de salida, puentes, estación de bombeo, etc.
- un sistema de drenaje de campo, constituido por drenes entubados, buzones etc.

El Area Piloto Chacupe tiene una pequeña extensión; en consecuencia, no es posible dar costos reales sobre la construcción de un sistema de drenaje principal. Para la zona donde está ubicado el Area Piloto, este costo será compuesto por costos de excavación de colectores y la construcción de obras de arte, etc. Solamente con fines de investigaciones una estación de bombeo fué construída en el Area Piloto Chacupe. Sin embargo, para el drenaje de la zona no es necesario la construcción de la estructura mencionada, porque el agua puede ser evacuada por gravedad hacia el mar.

Los costos del sistema de drenaje de campo fueron analizados por CENDRET (1971a) y FAJARDO (1973). Se calculó para el Area Piloto Chacupe un costo total para la instalación de 100 metros de drenes entubados a una profundidad de 2.0 m en S/. 5,835 (US \$ 134)¹. Este total se ha especificado en:

- replanteo y excavación de zanjas	S/. 2,176 (US\$ 50)
- material filtroprotector de 5 m ³ de grava/100 m -de drenes	S/. 800 (US\$ 18)
- colocación de 100 m de tubos de arcilla (Ø interior 10 cm) y tapado de la zanja	S/. 2,859 (US\$ 66)

¹ US\$ = S/. 43.50

El costo para la instalación de un sistema de drenaje de campo no es igual para toda la Costa Peruana, debido a que el costo de la mano de obra varía de una region a otra. A veces la fábrica que produce los tubos de drenaje, se encuentra cerca del lugar del proyecto de drenaje; en el caso contrario hay que sumarle un costo adicional al precio del tubo propio, debido al transporte. Además la grava de buena granulometría no se encuentra disponible en todos los valles de la Costa. En el caso del Area Piloto de Drenaje la Boya en el valle de Camaná, en el sur del Perú, se ha calculado un costo de S/. 4,713 (US\$ 108) por 100 m de drenes instalados a una profundidad de 2 m y con 5 m³ de grava cada 100 m de dren como material filtro protector.

8.3 Costos del proceso de lavado y aplicación de enmiendas químicas

Incluye los siguientes aspectos:

- el lavado sin cultivos, hasta un nivel tolerante para el arroz,
- el lavado con el cultivo de arroz,
- la aplicación de mejoradores químicos, y
- la labranza del suelo para mejorar las características físicas del suelo, p.e. el subsolado.

El lavado del suelo antes de iniciar el cultivo de arroz tuvo una duración de apenas 2 meses en la primera etapa. En vista del bajo rendimiento en la primera campaña se decidió lavar el suelo en la segunda etapa por un tiempo mayor para asegurar una producción más alta. Por tal motivo el costo del lavado fué calculado a partir de los datos de la segunda etapa: fué en total S/. 6,390/ha (US\$ 147/ha). Este costo incluye jornales para el riego, reparación de bordos y limpieza de drenes; además jornales y combustible para el funcionamiento del sistema de bombeo. El costo de la operación del sistema de bombeo fué de S/. 4,500/ha (US\$ 104/ha), costo que *no* se incluye en el caso de un sistema de drenaje por gravedad. En el caso de la zona de Chacupe, donde la evacuación de las aguas de drenaje será por gravedad, el costo de lavado, entonces, se reducirá a S/. 1,890/ha (US\$ 43/ha).

Después de un cierto tiempo de lavado existen dos alternativas para seguir la recuperación:

- lavar el suelo hasta llegar a un nivel de salinidad muy bajo, o
- implantar un cultivo que tolera una salinidad alta en combinación con una aplicación de agua en exceso a la necesidad del cultivo.

Para el Area Piloto Chacupe se ha escogido la última alternativa.

Un análisis de los costos para la campaña 1972/1973 fué elaborado por SUDRET (1973). Los costos de todas la actividades incluyendo la preparación de almácigos, la preparación del terreno para el transplante, el transplante, labores culturales, la cosecha, el mantenimiento del sistema de drenaje (en caso de contar con un sistema de drenaje por gravedad), beneficios sociales al personal obrero y la dirección técnica asciende a S/. 19,320/ha (US\$ 444/ha). El ingreso por la venta de la cosecha de arroz es de S/. 29,540/ha (US\$ 679/ha). Por lo tanto el ingreso unitario es de S/. 10,220/ha (US\$ 235/ha), lo cual corresponde a una producción bruta de 5,820 kg/ha. Comparando los análisis de costo de la campaña 1972/1973 y la campaña 1973/1974 (pronóstico SUDRET, 1973), es posible deducir que un ingreso unitario nulo corresponde aproximadamente a una producción bruta de unos 3,000 kg/ha (ver Cap.7.7) en el caso de un sistema de drenaje por gravedad.

9. Características hidrodinámicas del subsuelo. Medición y evaluación

9.1 Generalidades

El objeto de un sistema de drenaje es proporcionar al suelo un horizonte sin excesiva humedad que permita el desarrollo normal de las raíces de las plantas.

Esto implica el conocimiento de los siguientes factores:

- profundidad del nivel freático requerido por los cultivos que se piensan implantar,
- el exceso de agua que debe ser evacuado, y
- las características hidrodinámicas del subsuelo, tales como la profundidad de la capa impermeable y la conductividad hidráulica.

9.2 La capa impermeable

La capa impermeable es un estrato a través del cual el flujo de agua es muy restringido, tanto en la dirección vertical como en la horizontal. La conductividad hidráulica es muy baja. Una capa se considera impermeable cuando su conductividad hidráulica sea inferior a 10% de la conductividad hidráulica de los estratos superiores.

El material que constituye la capa impermeable es compacto o cementado; puede ser consolidado también cuando se trata de sedimentos más antiguos. La textura normalmente es fina aunque no todos los sedimentos de textura fina son impermeables. Al realizarse perforaciones, el material de la capa impermeable aún cuando está por debajo del nivel freático parece ser más seco que el material de las capas más superficiales.

En el estudio del subsuelo del Area Piloto Chacupe (ORE, 1972) se ha encontrado estratos compactados y secos, de textura arcillosa a una profundidad y espesor variable. La extensión horizontal de estos estratos es limitado (ver Fig.10). Por debajo y por encima de estos estratos arcillosos se encuentran capas de textura media y gruesa, con lentes de textura fina. En el Area Piloto, a una profundidad variable entre 6 y más de 13 m se encontró un material completamente distinto, de origen pleistocénico. Este material es compacto y en algunas partes contiene carbonato de calcio fuertemente cementado en cantidades variables (desde menos de 1% hasta más de 30%). La textura predominante es FrA, Fr y FrArA con contenido variable de grava. Se presenta en toda la zona de Chacupe aunque no siempre a la misma profundidad: cerca del Area Piloto puede ser observado en algunas elevaciones por encima del piso actual del valle. La conductividad de este material es baja y pruebas de campo han revelado un valor K promedio

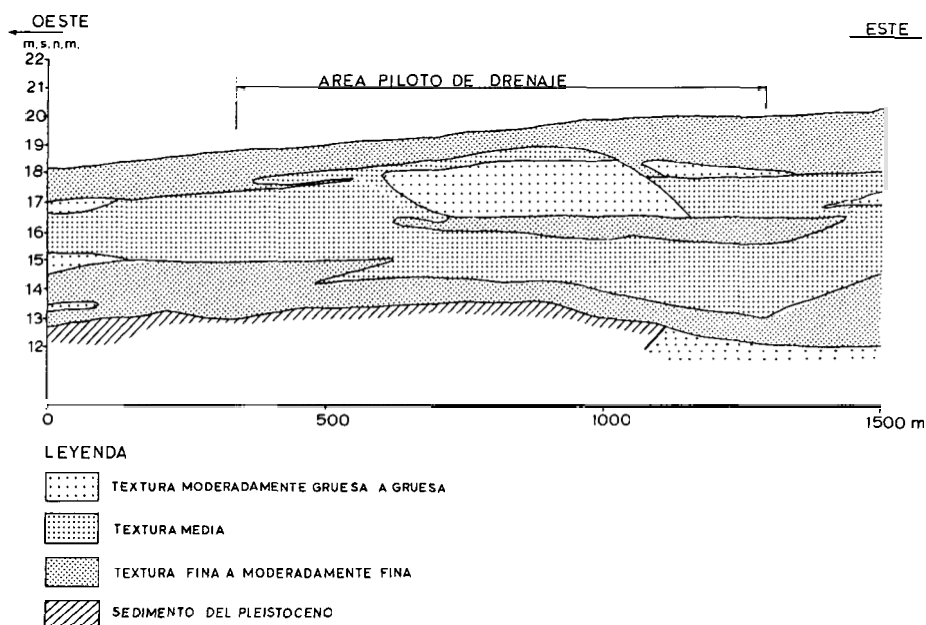


Fig. 10. Sección transversal del subsuelo.

aritmético de 0.2 m/día.

Con fines de diseño de un sistema de drenaje para la zona de Chacupe, el último estrato encontrado se ha considerado como la capa impermeable. Sin embargo, los estratos de arcilla a una profundidad de 3.0 a 4.5 m podrían tener un efecto en el funcionamiento del sistema de drenaje diseñado en tal forma que será necesario modificar posteriormente en algunas partes el sistema de drenaje propuesto.

9.3 La conductividad hidráulica

9.3.1 A partir de mediciones de campo

Existen muchos métodos para medir la conductividad hidráulica (CH o K) de un suelo, que han sido desarrollados para diferentes condiciones. Hay métodos para medir la CH en el laboratorio o en el campo. Con algunos métodos se determina la CH de un gran volumen de suelo mientras que con otros, este volumen es reducido. Asimismo es posible medir la CH de la zona no saturada, por encima del nivel freático, o en la zona saturada por debajo de éste. Para tener una descripción completa de los diferentes métodos para su determinación se puede referir a la literatura existente (LUTHIN, 1957; CENDRET, 1969; ILRI, 1973; van SCHILFGAARDE, 1974).

En el estudio del subsuelo del Area Piloto Chacupe (y de los demás estudios en el Perú) se ha adoptado el método de agujero de barrena (auger hole) para determinar la CH. Este método es conocido y ampliamente descrito en la literatura (van BEERS, 1963; CENDRET, 1969; FAO/UNESCO, 1973; ILRI, 1973). Es un método fácil, rápido en su ejecución y apto para trabajos de rutina. Se determina la CH por debajo del nivel freático.

Dentro de los límites del Area Piloto se efectuó 28 mediciones o sea una medición en cada 1.2 ha. Sin embargo, esta densidad de mediciones, no implica que sea necesario ni recomendable en estudios de drenaje de mayor escala. En los alrededores del Area Piloto también se ha determinado la CH en unos 88 puntos con una densidad de aproximadamente una medición cada 25 ha. Se ha determinado la CH de los estratos confinados entre el nivel freático, que se encontraba a una profundidad variable de 0.5 a 1.8 m hasta una profundidad máxima de 2.6 m. Los valores de la CH encontrados son muy variables, ya que los suelos de la zona son muy estratificados, con capas de 0.1 a 3.0 m de espesor, que lateralmente muchas veces no se extienden más de 100 a 300 m. La distribución de la frecuencia acumulada de la conductividad hidráulica K para el Area Piloto y los alrededores se muestran en la Figura 11. De esa figura se puede observar que en los alrededores del Area Piloto Chacupe se ha encontrado mayor cantidad de estratos arenosos con alto valor K y también más estratos arcillosos con bajo valor K, en relación con los valores encontrados dentro del Area Piloto.

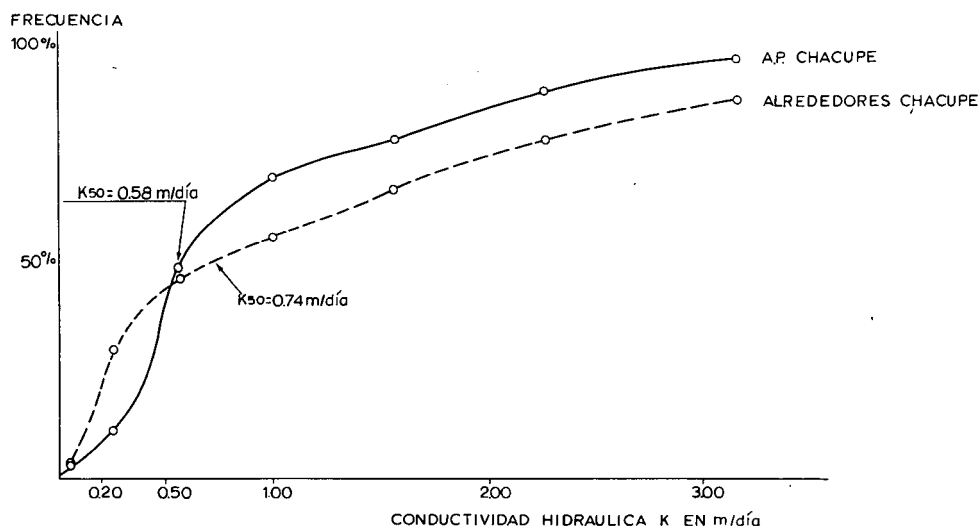


Fig.11. Curva de distribución de las mediciones de la conductividad hidráulica. Area Piloto Chacupe y alrededores.

Para el subsuelo del Area Piloto, la CH promedia aritmética es de 1.2 m/día y para los alrededores 1.5 m/día. Sin embargo, es dudoso si la CH promedia aritmética es un valor que se puede usar en los cálculos de espaciamiento de drenes. En un medio heterogéneo tal como es el subsuelo en el Area Piloto y los alrededores, el flujo de agua se produce a través de capas diferentes en valores de K. Como ha sido explicado por BOUWER (1969), el flujo de agua en un medio heterogéneo sea una combinación de un flujo de tipo paralelo y de series. El valor K real pues, será inferior al promedio aritmético (flujo paralelo) y superior al promedio armónico (flujo de series). El valor K real será igual o muy cerca de la media geométrica. En el Cuadro 13 se puede observar el promedio aritmético, armónico y geométrico de las mediciones de la CH hechas en el Area Piloto Chacupe.

CUADRO 13. LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA (m/día) DEL AREA PILOTO CHACUPE

Promedio	Ecuación	K
Aritmético	$K = \frac{K_1 + K_2 + K_3 \dots + K_n}{n}$	1.18
Armónico	$K = \frac{n}{(1/K_1 + 1/K_2 + \dots + 1/K_n)}$	0.20
Geométrico	$K = \sqrt[n]{K_1 \times K_2 \times K_3 \times \dots \times K_n}$	0.72

La media geométrica del valor K es muy parecida a la mediana (K_{50}), que se obtiene de la distribución de la frecuencia acumulada (ver Fig.11). Por encontrar-se en el subsuelo perfiles texturales muy variables, se ha agrupado las mediciones de la CH según la textura del subsuelo. Fueron eliminadas las mediciones en las cuales se encontró más de una sola capa textural. Los resultados se muestran en el Cuadro 14.

CUADRO 14. CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA SEGUN LA TEXTURA

Textura	Conductividad hidráulica (m/día)	
	promedio	coeficiente de variación (%)
Textura fina: (Ar, ArL, FrAr y FrArL)	0.20	74
Textura media: (FrAf, Fr, FrAmf y FrL)	1.00	59
Textura gruesa: (Am y Ag)	4.75	49

Se puede observar que aun cuando se agrupa las mendiciones de la CH según clases texturales, la variación es bastante. Este fenómeno ha sido observado por TALSMA y FLINT (1958).

9.3.2 A partir de una evaluación del sistema de drenaje

Cuando existe un sistema de drenaje instalado, es posible evaluar las características hidrodinámicas del subsuelo por debajo del nivel freático. El espaciamiento de drenes es calculado mediante formulas de drenaje, una de las cuales en su forma simplificada es:

$$L^2 = \frac{8 K_d \Delta h}{q} \quad (9)$$

Esta fué desarrollada por HOOGHOUTD (CENDRET, 1969; ILRI, 1973) y se aplica para condiciones de flujo estacionario, descontándose el efecto del flujo en estratos superiores al nivel de los drenes (ver Anexo 3).

De la Ec.(9) se puede deducir las características hidrodinámicas de los estratos por debajo del nivel de los drenes:

$$K_d = \frac{L^2 q}{8 \Delta h} \quad (10)$$

Con un sistema de drenaje instalado, el espaciamiento entre drenes, (L), es un factor conocido. Cuando se determina la descarga q y la carga hidráulica Δh , es posible calcular el valor K_d , que se llama la transmisividad de los estratos del acuífero por debajo del nivel de los drenes a través de los cuales fluye el agua hacia las tuberías.

Por ser la Ec.(10) una fórmula válida solamente en condiciones de flujo estacionario no se puede tomar los datos de q y Δh cuando el nivel freático está fluctuando, porque no existe una relación estricta entre la carga hidráulica y la descarga. Este caso sucede cuando se riega después de una época seca. Por tal motivo se debe limitar a los datos de q y Δh , cuando el nivel freático se mantiene a un nivel más o menos constante, sea en barbecho o con el terreno cultivado con arroz.

Otro factor importante es la pérdida de carga hidráulica por la resistencia de entrada, cuyo efecto debe ser eliminado. La carga hidráulica Δh empleada en la evaluación de la transmisividad, pués, será la diferencia de la carga hidráulica medida en el punto en medio entre los drenes (Δh , Cap.6.4), menos la carga hidráulica, medida a una distancia de 10 cm del eje del dren (Δh_e , Cap.6.4).

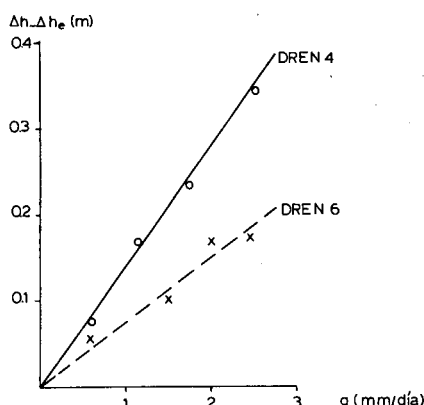


Fig.12. Relación descarga - carga hidráulica.

En la Figura 12, se ha graficado la relación descarga-carga hidráulica (q versus $\Delta h - \Delta h_e$) para dos líneas de drenes de tubos de arcilla. En estos drenes la pérdida de carga hidráulica por la resistencia de entrada no fue muy elevada y entonces ha sido posible medir la diferencia $\Delta h - \Delta h_e$ con suficiente exactitud. Se puede deducir que para el dren 4 una descarga de 2.5 mm/día corresponde a una carga hidráulica de 0.35 m y para el dren 6 una descarga de 2.0 mm/día corresponde a una carga hidráulica de 0.15 m y conociendo el espaciamiento de los drenes ($L = 36$ m) es posible calcular el valor K_d . El término " d " es la "profundidad del estrato equivalente", un fenómeno en función del espaciamiento L entre drenes, el radio del dren entubado r_o y la profundidad de la capa impermeable por debajo del nivel de los drenes (D) (ver Anexo 3).

En la parte del Area Piloto donde están ubicados los drenes 4 y 6, se encuentra una capa de arcilla compacta a una profundidad de 4.5 m (o sea 2.5 m por debajo del nivel de los drenes) que se puede considerar como capa impermeable. Otro estrato que se encuentra por debajo de toda el área piloto es el material compacto de la época pleistocénica (Cap.9.2) y está a una profundidad de aproximadamente 8 m por debajo del nivel de los drenes 4 y 6. Para ambos casos el valor d se ha determinado con las tablas preparadas por VAN BEERS (1965) y luego se ha calculado el valor K , valor que corresponde a la conductividad hidráulica de los estratos confinados entre aproximadamente 2 a 5 m de profundidad (ver Cuadro 15).

CUADRO 15. LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA K (m/día) OBTENIDA A PARTIR DE LA RELACION CARGA HIDRAULICA-DESCARGA (DRENES 4,6 y 22)

Dren	D (m)	d (m)	K_d (m ² /día)	K
4	2.5	1.9	1.2	0.63
	8.0	2.9	1.2	0.42
6	2.5	1.9	2.0	1.05
	8.0	2.9	2.0	0.69
22	4.5	3.4	4.2	1.24
	10.0	5.8	4.2	0.72

La misma evaluación se efectuó para el dren 22 en la segunda etapa, donde también el efecto del flujo por encima de los drenes es mínimo. El valor K calculado para este dren, corresponde a la conductividad hidráulica de los estratos confinados entre 2 y 8 m de profundidad aproximadamente (ver Cuadro 15).

A lo largo de los drenes 4 y 6, el subsuelo tiene una textura de FrAf y FrL y a lo largo del dren 22 la textura es más variable, encontrándose Am-g, mezclada con capas de FrL y FrArL.

En el area Piloto existen drenes donde puede suponerse que la CH del subsuelo es muy reducida. No se puede descartar entonces el flujo de agua encima del nivel de los drenes y la fórmula de drenaje para emplear (ver Anexo 3) en este caso será:

$$q = \frac{8K_b d \Delta h}{L^2} + \frac{4K_e \Delta h^2}{L^2} \quad (11)$$

donde

K_b = la conductividad hidráulica del horizonte bajo de los drenes, y

K_e = la conductividad hidráulica del horizonte encima de los drenes.

$$\frac{q}{\Delta h} = \frac{8K_b d}{L^2} + \frac{4K_e \Delta h}{L^2} \quad (12)$$

ecuación que representa una recta del tipo $y = ax + b$.

Cuando se plotéa los valores $q/\Delta h$ versus Δh , la intersección de la recta obtenida con el eje de las ordenadas es el término $8K_b d/L^2$ y la pendiente de la recta el término $4K_e/L^2$.

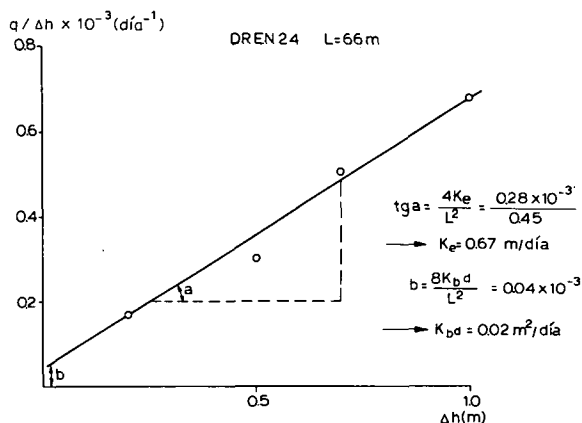


Fig.13. Determinación gráfica de la conductividad hidráulica.

En la Figura 13 se ha graficado los datos $q/\Delta h$ versus Δh , obtenidos del dren 24. Como el espaciamiento entre drenes L es conocido, se puede calcular:

$$K_b d = 0.02 \text{ m}^2/\text{día}$$

$$K_e = 0.67 \text{ m/día}$$

Estos valores se debe a que a lo largo del dren 24 se ha encontrado entre 1.2 y 2.0 m de profundidad una capa de arcilla con lentes de textura Am y FrL y por debajo del nivel del dren se encontró solamente arcilla hasta una profundidad de más de 4.0 m.

9.3.3 Comentario final

Los datos sobre la CH hallados con una evaluación del sistema de drenaje mediante el método carga hidráulica-descarga corresponden bien con los valores K encontrados para las diferentes clases texturales. Además confirman que el promedio geométrico y la mediana del valor K , K_{50} , son valores bastante reales que pueden ser usados con fines de diseño.

El valor K promedio aritmético es el doble del K promedio geométrico, el cual sobreestima la CH del subsuelo. Sin embargo, queda por añadir que en las fórmulas de drenaje para calcular el espaciamiento entre drenes, la CH figura en forma de la raíz cuadrada. Entonces, una diferencia de 100% entre K promedio aritmético y K promedio geométrico ya está reducido a menos de 50%. Esto quiere decir que pequeñas diferencias en los valores de la CH cuando se emplean en las fórmulas de drenaje para calcular el espaciamiento entre drenes, no son muy significativas.

10. Resumen y recomendaciones

10.1 Resumen

El suelo del Area Piloto Chacupe es de textura moderadamente fina a fina hasta una profundidad variable de 60 cm a más de 150 cm. El nivel freático se encontró a una profundidad variable entre 0.9 a 1.2 m (ver Cap.3.2).

El suelo del Area Piloto Chacupe, como en toda la zona de Chacupe, es muy heterogéneo (ver los Cap.2.2 y 9.2). Un sedimento antiguo (pleistocénico) de origen aluvial probablemente se pueda considerar como la capa impermeable. Se encuentra a una profundidad variable de 6 a más de 13 m (ver Cap.9.2).

Inicialmente el suelo del Area Piloto Chacupe fué muy salino-sódico (ver Cap.3.4).

Se determinó una CE_e de 153.0 y de 116.2 mmhos/cm en las capas superficiales de 0 a 10 y de 10 a 20 cm de profundidad, respectivamente. Los valores RAS del extracto de saturación en las mismas capas fueron de 102 y 88, respectivamente. Después de una breve época de lavado seguido de tres campañas de arroz, la relación CE_{ef}/CE_{ei} se ha reducido a 0.17 (ver Cap.7.3). Sin embargo, se estima que por lo menos tres campañas más de arroz sean requeridos antes de que se pueda implantar otros cultivos conocidos en la zona, como la alfalfa y el maíz.

Los análisis del contenido de yeso y del sodio intercambiable en suelos muy salinos son inexactos, haciendo difícil la utilización de sus resultados (ver Anexo 1).

Por este motivo, la desodificación se ha evaluado mediante el valor RAS del extracto de saturación. Este valor indica que la sodificación se ha desarrollado satisfactoriamente en la primera etapa del área piloto (ver Cap.7.4). Sin embargo, con una evaluación de las curvas de retención de humedad se llegó a una conclusión opuesta: hay indicaciones de que la estructura del suelo está degradándose (ver Cap.7.6 y 7.7).

Durante el proceso de lavado, una parte del yeso aplicado como mejorador químico en la primera etapa, ha sido transportado hacia capas más profundas (ver Cap.7.4). Esto se debe a que en presencia de NaCl, que es la sal predominante en los suelos del área piloto, se aumenta la solubilidad del yeso. Gracias a esta experiencia no se aplicó yeso antes del inicio del lavado en la segunda etapa del Area Piloto Chacupe. Durante los primeros meses del lavado efectuado en esta etapa, tanto la salinidad como el valor RAS decrecieron. Sin embargo, después de 9 meses de lavado aumento ligeramente el valor RAS del extracto de saturación, indicación de la necesidad de aplicar yeso después de tal período de lavado.

El rendimiento de arroz en el Area Piloto Chacupe, en la segunda campaña, fué de 4,850 kg/ha con una CE_e promedio en la capa superficial (0-20 cm) de 18.6 mmhos/cm en el momento del transplante. En la tercera campaña se logró un rendimiento de 5,820 kg/ha con una CE_e promedio de 16.0 mmhos/cm en la misma capa en el momento de transplante. El alto rendimiento de la tercera campaña se debió también a las condiciones climáticas muy favorables.

Durante la breve época de lavado y tres campañas de arroz se ha aplicado una lámina total de agua de 6,800 mm, inclusive la precipitación. De esta lámina, el 25% se infiltró en el suelo (ver Cap.7.3).

Se elaboró un balance de agua a partir de la cual se llegó a la conclusión de que el flujo subterráneo que ingresa al área (upward seepage) es del orden de 1.1 a 1.7 mm/día (ver los Cap.7.2.1 y 7.2.2). La evapotranspiración calculada mediante el balance de agua fué mucho mayor que la evaporación medida en un tanque "Clase A" o a la evapotranspiración potencial calculada según la fórmula de PENMAN (ver Cap.7.2.1).

El colector profundo excavado en el Area Piloto Chacupe tiene un gran efecto sobre la depresión del nivel freático. Sin embargo, por la heterogeneidad del subsuelo en gran parte del valle será difícil estimar el efecto de un sistema de colectores propuesto en un diseño sobre la depresión del nivel freático en la zona (ver Cap.6.3). El sistema de drenaje de campo, instalado en la primera etapa ha sido diseñado excesivamente denso, porque se ha subestimado el efecto del dren colector y la profundidad de la capa impermeable.

Con respecto al comportamiento de los tubos y de los materiales filtroprotectores se llegó a la conclusión que tanto los tubos de plástico (liso y corrugado) como los de arcilla se han comportado bien. De los materiales filtroprotectores empleados, paja de lino, paja de arroz, lana de vidrio y grava, solamente la grava se comportó en forma adecuada (ver Cap.6.4).

El suelo de relleno en la zanja donde se ha colocado el tubo de drenaje, tiende a dispersarse por el efecto del alto contenido de sodio intercambiable. Como consecuencia, la resistencia de entrada aumenta con el tiempo (ver Cap.6.4).

La conductividad hidráulica fué medida con el método de Agujero de Barrena (auger hole method). El promedio geométrico de las mediciones del valor K así como la mediana (K_{50}) son valores reales para cuantificar la conductividad hidráulica de subsuelos heterogéneos. Se llegó a esta conclusión comparando las mediciones de campo (con agujero de barrena) con la conductividad hidráulica evaluada a partir de datos sobre la descarga de los drenes (q) y la altura del nivel freático entre los drenes sobre el nivel de estos (Δh) (ver Cap.9.3).

10.2 Recomendaciones

En suelos muy salinos será recomendable iniciar la recuperación con un lavado hasta que la CE_e en la capa superficial (0-20 cm) sea aproximadamente de 20 mmhos/cm. A partir de ese grado de salinidad se puede implantar arroz, continuándose la recuperación paralela a una actividad agrícola rentable (Cap.7.7).

Para evitar una pérdida de yeso por lavado hacia capas más profundas en suelos salinos donde predomina el NaCl, se puede postergar la aplicación de esta enmienda química hasta un cierto período después del inicio del lavado. Para las condiciones de los suelos del Area Piloto Chacupe, este período será entre 6 y 9 meses (Cap.7.7).

El yeso aplicado como enmienda química debe ser incorporado a rastra a una profundidad de 5 a 10 cm.

La sodificación o la desodificación podría ser evaluado con el valor RAS, pH y el contenido de aniones CO_3 o HCO_3 en el extracto de saturación, debido a que el análisis del sodio intercambiable en suelos salinos es muy inexacto (Anexo 1).

Para evitar que el sistema de drenaje sea excesivamente denso, es aconsejable diseñar únicamente el sistema de los drenes troncales, colectores y drenes secundarios en forma definitiva. La necesidad de un sistema de drenajes de campo debe ser evaluado también con fines del financiamiento del proyecto. Sin embargo, el diseño de tal sistema debe ser considerado como tentativo. Durante la excavación de los drenes principales, el efecto del mismo sobre la depresión del nivel freático deberá ser evaluado. Asimismo será posible modificar el diseño tentativo del sistema del drenaje de campo empleando criterios reales.

Será recomendable poner un material filtroprotector sobre la línea de tubos de drenaje. De los diferentes materiales empleados se llegó a la conclusión que la grava se comporta en forma adecuada. Deberá ser aplicado en una cantidad de $5 \text{ m}^3/100 \text{ m}$ de drenes y no debe ser muy gruesa en cuanto a su tamaño (Cap. 6.4.4).

Para cuantificar la conductividad hidráulica de subsuelos heterogéneos, es aconsejable tomar el promedio geométrico o la mediana de las mediciones K_{50} (Cap.9.3).

Anexo 1. Análisis químicos y físicos

1.1 Análisis químicos

Para caracterizar los suelos salino-sódicos se ha realizado los siguientes análisis:

CE del extracto de saturación,
pH,
cationes y aniones solubles,
capacidad de intercambio catiónico CIC,
sodio intercambiable,
carbonato de calcio, y
yeso.

La CE del extracto de saturación define indirectamente la salinidad total en el suelo y conjuntamente con la capacidad de intercambio catiónico y el sodio intercambiable se obtiene información directa sobre el grado de sodificación. Las determinaciones del Ca + Mg y Na solubles proporcionan una forma indirecta para estimar el grado de sodificación, igual que el valor pH, la presencia del anión CO_3 y abundancia del anión HCO_3 soluble. La presencia del yeso y del carbonato de calcio es de importancia en suelos salino-sódicos, porque calcio al solubilizarse desplaza al sodio del complejo de intercambio.

Los métodos empleados para los análisis fueron los siguientes:

- salinidad total mediante la CE del extracto de saturación (RICHARDS, 1954: método 3a),
- cationes solubles en el extracto de saturación (RICHARDS, 1954: método 7, 10a y 11a),
- aniones solubles (menos el sulfato) en el extracto de saturación (RICHARDS, 1954: métodos 12 y 13),
- sulfato soluble fué determinado mediante titulación con bencidina (HOFSTEE, 1966) o calculado de la diferencia entre la suma de los cationes y aniones,
- el sodio intercambiable y la capacidad de intercambio catiónico se ha determinado en acetato de amonio en pH 7.0, utilizando la técnica de percolación en la obtención del extracto amónico (BLACK, 1965),
- el carbonato de calcio fué determinado con un método volumétrico (HOFSTEE, 1966). Se midió el volumen de CO_2 liberado por la reacción del ácido clorhídrico con el carbonato de calcio, y
- el yeso por el método de dilución (RICHARDS, 1954: método 22c).

Aunque los métodos escogidos son comunes, todavía existen ciertas dudas sobre los resultados obtenidos cuando se trata de análisis de suelos muy salinos. En el análisis de los suelos del Area Piloto Chacupe, que son extremadamente salinos y

con alto grado de sodificación, los problemas encontrados fueron los siguientes:

- en la preparación del extracto de saturación de los suelos de las capas superficiales se ha observado que al obtenerse el extracto, algunas veces las sales se precipitan en el recipiente. La CE de estos extractos fué más alto que 200 mmhos/cm,
- en los análisis de las sales solubles en el extracto de saturación de suelos muy salinos está incluido un error que se debe al fenómeno de la adsorción negativa (BOWER & HATCHER, 1962). Debido a este fenómeno el contenido de aniones y cationes solubles determinado en el extracto de saturación, efectivamente es mayor que la concentración real. La última se puede obtener mediante un lavado intensivo. Para los suelos de Chacupe se encontró una concentración en el extracto de saturación hasta 25% más alta que la concentración real,
- la determinación de la CIC y del sodio intercambiable en suelos muy salinos no es exacto. La finalidad del lavado con alcohol, previa a la extracción de los cationes intercambiables con el acetato de amonio, es eliminar todos los cationes solubles. Sin embargo es difícil estandarizar este lavado; se ha observado que ciertas muestras retienen, aun después de un lavado intensivo, una parte del sodio soluble que posteriormente es determinado como sodio intercambiable. El método propuesto por RICHARDS (1954: método 20a) para determinar el sodio intercambiable en suelos muy salinos tampoco dará resultados exactos, dado el fenómeno de la adsorción negativa (BOWER & HATCHER, 1962),
- vista la inexactitud en la determinación del contenido del sodio intercambiable en suelos muy salinos, este se puede estimar cuando la relación RAS-PSI es conocida. La relación RAS-PSI encontrada por RICHARDS (1954) no es exactamente igual a la relación encontrada para los suelos de Chacupe y probablemente tampoco en otras partes de la Costa Peruana, ya que la composición mineralógica es distinta. Por este motivo se ha determinado la relación mencionada para los suelos de Chacupe, equilibrando el suelo con soluciones de diferente valor RAS para determinar posteriormente el valor PSI (Cap.7.4, Fig.9),
- la determinación del yeso en suelos muy salinos es problemático. Empleando el método 22b de RICHARDS (1954), aparte de la precipitación del yeso con acetona, se precipita también una parte del $MgSO_4$ y Na_2SO_4 , y el contenido determinado así resulta más alto que lo real. Aunque existen ciertas dudas con respecto a los resultados del contenido de yeso en suelos muy salinos, empleando el método 22b (RICHARDS, 1954), el yeso determinado con el método 22c tampoco dará resultados exactos. Sin embargo, por ser más conveniente en los análisis de rutina, se ha adoptado el método 22c, aunque los resultados requieren de una interpretación con mucha precaución.

1.2 Análisis físicos

Para la caracterización física del suelo se ha determinado la textura y la curva de retención de humedad.

La textura fué determinada con el método de hidrómetro (ASTM, 1961). El carbonato de calcio y la materia orgánica no fueron eliminadas. Sin embargo para eliminar el efecto de las sales solubles ha sido necesario lavar las muestras que

tenían una CE_e mayor a 10 mmhos/cm a 25 °C. Cuando el suelo tiene un alto contenido de sales la dispersión no será completa, resultando en un porcentaje de limo demasiado alto y un porcentaje bajo de arcilla (VASCONCELLOS, 1971).

El volumen de agua retenida en los suelos se presenta en forma de curvas de retención de humedad o curvas de pF. El valor pF es el logaritmo de la succión (o presión) aplicado en cm de altura de agua bajo el cual el suelo retiene un determinado contenido de agua (succión de 100 cm corresponde al valor pF=2.0).

El método empleado para determinar la curva de retención de humedad fué desarrollado por STAKMAN (1969). La metodología de determinación fué la siguiente:

Las muestras de suelo saturado son colocadas por encima de una matriz de arena muy fina (caja de arena). Esta matriz de arena queda saturada hasta una succión de más de 100 cm de agua, entonces, la succión aplicada a la arena se transmite a través de esta a las muestras de suelo. Sin embargo, a una succión mayor de 130 cm de agua, la arena muy fina pierde el agua y por lo tanto el contacto con las muestras de suelo colocadas por encima de la matriz de arena.

Para medir la retención de agua a mayor succión, las muestras de suelo son colocadas por encima de una matriz de arena muy fina y kaolín (caja de kaolín). Consiste de un cuerpo de arena muy fina mezclada con kaolín en las láminas superficiales y con una manta de kaolín en la superficie. Esta matriz arena-kaolín retiene el agua y se queda saturada hasta una succión de 800 cm de agua aproximadamente. Con la caja de kaolín se ha determinado la retención de agua hasta un valor pF igual a 2.7 (501 cm de succión de agua).

Para la determinación de la retención de humedad a valores de pF mayores de pF 3.4 a 4.2, es necesario someter las muestras a presión. Esto se realiza con un aparato denominado membrana de presión. El agua en el suelo está retenida en poros de diámetros muy diferente. Con baja succión (hasta pF = 2.7) el agua está retenida en poros dentro de los agregados y entre éstos. Entonces, la estructura del suelo juega un papel importante. Por lo tanto, la retención de agua se determine en muestras de suelo no alteradas. A alta succión, el agua está retenida en los poros de pequeño diámetro, entonces, la estructura del suelo ya no es un factor importante y se puede utilizar muestras alteradas.

Anexo 2. Perfil típico del suelo en el Area Piloto Chacupe

Profundidad (cm)	Descripción
0 - 6	Polvo seco, sin estructura (grano simple), abrupto y ondulado sobre
6 - 15	Franco Arcilloso, 10 YR 3/2 (húmedo), duro (seco), con estructura blocosa angular y subangular media moderada, cristales de sal, difuso y ondulado sobre
15 - 30	Franco Arcilloso, 10 YR 3/1 (húmedo), ligeramente duro (seco), con estructura blocosa subangular gruesa moderada, desgredando en blocosa subangular fina moderada, moteaduras de cal, difuso y ondulado sobre
30 - 70	Arcilla, 10 YR 3/1 (húmedo), firme (húmedo), con estructura prismática media moderada desgredándose en blocosa angular y subangular media moderada. Concreciones de cal y moteaduras de cal, películas de arcilla, difuso y ondulado sobre
70 - 86	Franco Arcillo Limoso, 10 YR 3/2 (húmedo), firme (húmedo), con estructura blocosa subangular gruesa débil con concreciones de cal, moteaduras de fierro, difuso y ondulado sobre
86 - 100	Franco Arcilloso, 10 YR 3/2 (húmedo), firme (húmedo), con estructura blocosa subangular gruesa débil con concreciones de cal, moteaduras de fierro, difuso y ondulado sobre
100 - 130	Franco, 10 YR 4/2 (húmedo), friable (húmedo) sin estructura (migajosa), concreciones de cal, moteaduras de fierro.

Inicialmente el suelo no tenía estructura en el horizonte superficial. Posteriormente, al ser regado, se transformó en una masa densa en que al secarse, se forman ranuras que tienen de 1 a 2 cm de ancho y más de 30 a 50 cm de profundidad.

Anexo 3. Conceptos de drenaje de tierras agrícolas

Drenaje es el removimiento del exceso de agua que se encuentra sobre el terreno (drenaje superficial) y/o en el perfil del suelo (drenaje subterráneo).

En este anexo se ha tratado solamente en breve los principios de drenaje subterráneo. Para mayor información se puede referir a LUTHIN (1957), CENDRET (1969); ILRI (1973) y van SCHILFGAARDE (1974).

Las tres funciones principales de un sistema de drenaje subterráneo, según van BEERS (1966) son drenar el suelo

- para asegurar el buen desarrollo de los cultivos en la época vegetativa,
- para tener el suelo en buenas condiciones para su preparación, y
- para controlar la salinidad del suelo.

Con la instalación de un sistema de drenaje, generalmente logramos el removimiento del exceso de agua en el perfil del suelo. Para el diseño de tal sistema existe una serie de fórmulas que para saberlas aplicar requieren un conocimiento básico del flujo de agua subterráneo y además un conocimiento de todo los factores que determinan el exceso de agua en el suelo, las características hidrodinámicas del subsuelo, la relación agua-suelo-planta, etc.

El régimen de flujo de agua subterráneo es determinado por la ley de DARCY (que describe el movimiento de agua en el suelo en condiciones saturadas) y la ecuación de continuidad. En forma combinada se las conoce como las ecuaciones de LAPLACE. Esas ecuaciones son difíciles para solucionar, pues simplificaciones han sido introducidos.

En el diseño de un sistema de drenaje, con excepción de sistemas que sirvan zonas de pequeña extensión y/o aisladas, la distancia entre drenes es de mucha importancia, ya que determina a grandes rasgos las inversiones necesarias. Existen fórmulas para determinar la distancia entre drenes (asimismo llamado espaciamiento), tanto de drenes entubados como abiertos. Algunas fórmulas describen el flujo estacionario, otras el flujo no-estacionario.

En el caso del flujo estacionario tenemos la descarga (el exceso de agua en el perfil del suelo que debe ser removido, o la recarga) como constante en intensidad y duración. Para tales condiciones la fórmula más conocida y más práctica es la llamada fórmula de HOOGHOUTT, en su forma más simple:

$$q = \frac{8Kd\Delta h}{L^2} \quad (13)$$

donde

- q = la descarga de los drenes por unidad de área (LT^{-1}),
- K = la conductividad hidráulica (LT^{-1}),
- d = la profundidad equivalente (L),
- Δh = la elevación del nivel freático con respecto al nivel de los drenes en medio de ellos (L), y
- L = el espaciamiento entre los drenes (L).

El exceso de agua que haya que remover del perfil determina la descarga q .

Proviene

- del surplús de la precipitación sobre la evapotranspiración,
- del agua de riego no retenida en el perfil del suelo, y
- de la recarga de agua en zonas bajas como consecuencia de pérdidas de agua de riego en zonas altas adyacentes.

La conductividad hidráulica K es una característica del suelo indicando la facilidad o dificultad con que el agua puede fluir a través del suelo por debajo del nivel freático (zona saturada). En un suelo isótropo, la conductividad hidráulica es la misma en todas las direcciones, sin embargo en suelo heterogéneo (por ejemplo estratificados) cada capa o horizonte tiene una conductividad hidráulica distinta.

La "profundidad equivalente" d es un factor que depende de la profundidad de la capa impermeable (definición de la capa impermeable, véase Cap.9.2) por debajo del nivel de los drenes, el radio del dren entubado o el perímetro mojado del dren abierto y el espaciamiento de los drenes.

La elevación del nivel freático con respecto al nivel de los drenes en medio de ellos, la carga hidráulica Δh , depende de la profundidad de los drenes y los requerimientos de los cultivos con respecto al grado de aeración en el sistema radicular y la profundidad del mismo.

El espaciamiento de los drenes L es el factor desconocido, puesto que la profundidad equivalente, d , entre otros depende del espaciamiento, tenemos que calcular L por tanteos.

HOOGHOUDT ha desarrollado también una fórmula práctica para computar el espaciamiento en un perfil de suelo de dos horizontes, cada uno con una conductividad hidráulica diferente:

$$q = \frac{8K_b d \Delta h + 4K_e \Delta h^2}{L^2} \quad (14)$$

donde

K_b = la conductividad hidráulica del horizonte bajo de los drenes, y

K_e = la conductividad hidráulica del horizonte encima de los drenes.

Esta fórmula tiene como limitación que su aplicación es válida solamente en el caso con los drenes instalados en el límite de los dos horizontes.

Más fórmulas para el cálculo del espaciamiento para el caso de flujo estacionario han sido desarrollado por KIRKHAM, DAGAN y ERNST.

En el caso de flujo no-estacionario tenemos la descarga (o recarga) como variable en intensidad y duración. Para calcular el espaciamiento de drenes en éste caso disponemos de soluciones como las fórmulas de GLOVER-DUMM y KRAYENHOFF van de LEUR-MAASLAND.

En la práctica, tanto la recarga por el surplus de la precipitación sobre la evapotranspiración como la recarga por riego (riego intermitente) nunca son constantes en intensidad y duración. Por tal motivo hay que aplicar las fórmulas no-estacionarias para el cálculo del espaciamiento de drenes. Sin embargo, son fórmulas mucho más complicadas que las del caso estacionario. Además para aplicarlas, información más detallada es requerida sobre por ejemplo la relación agua-suelo-planta, información que muchas veces no existe. Mencionadas fórmulas por las razones expuestas, no son muy usadas en la práctica.

Lo importante en aplicar fórmulas de drenaje está en conocer bien todos los factores que determinan el espaciamiento entre drenes.

La conductividad hidráulica y la profundidad de la capa impermeable son características del subsuelo. La primera se puede medir: existen un multiple de métodos para tal fin. La capa impermeable se puede localizar mediante perforaciones profundas en combinación con información geológica y geomorfológica.

La carga hidráulica Δh y la descarga q muchas veces son llamados "los criterios de drenaje".

Información sobre la descarga se puede obtener mediante un balance de agua. En climas áridas, varios factores determinan la descarga:

- la recarga que proviene de las pérdidas por percolación del agua de riego en el campo y es determinada por la eficiencia de aplicación,
- la recarga que proviene de pérdidas en el sistema de conducción y distribución de las aguas de riego y es determinada por la eficiencia de conducción,

- la recarga de agua que proviene subterráneamente de pérdidas en aplicación, conducción, distribución, etc. de las aguas de riego en zonas altas, y

- la recarga del agua de lavado, necesaria para mantener un buen balance de sales.

En climas húmedos el surplús de la precipitación sobre la evapotranspiración determina la recarga. Sin embargo, ambos factores varían con el tiempo en duración y intensidad.

El problema está en escoger un criterio, o sea un determinado valor del surplús que sea representativo para cierto período sin encontrarnos en ese período con una capacidad de descarga deficiente del sistema de drenaje diseñado. Podemos tomar el promedio de los surplús anuales registrados durante determinado número de años, o el promedio de los surplús mensuales, o el promedio de los surplús máximos, o un valor mayor que todos aquellos mencionados antes. Normalmente expresamos el criterio en una frecuencia de ocurrencia, por ejemplo un día (o más) al año. Para adoptar un cierto valor, resultado de cálculos estadísticos, necesitamos experiencia de campo con respecto a lo que pueda resistir cada cultivo en cuanto a mal aeración en la zona radicular.

La carga hidráulica tampoco se puede determinar con mucho exactitud. Depende de la resistencia que tenga determinado cultivo al agua excesiva en la zona radicular. Además depende de la profundidad de los drenes, sea el tubo, sea el nivel del agua en el dren abierto, que a su vez es determinada por la topografía y las posibilidades de evacuación de las aguas de drenaje hacia el mar, río o canal.

Determinar la profundidad del nivel freático requerida para cierto cultivo o serie de cultivos no es tan fácil. El nivel freático no se mantiene a una profundidad constante, sino es influenciado entre otros por la recarga. El problema entonces es tomar como criterio un nivel promedio o un nivel freático que no se mantiene más que determinado tiempo dentro de la zona radicular.

En varios países donde el drenaje ya es una práctica común, como EEUU, Holanda, Inglaterra o Iraq, se ha desarrollado criterios que funcionan bien en la práctica. Por ejemplo en Holanda, un país húmedo y templado, se aplica en tierras agrícolas muchas veces una descarga de 7 mm/día con una profundidad del nivel freático a 0.5 m. Con los drenes instalados a una profundidad de aproximadamente 1.0 m, esto implica una carga hidráulica Δh de 0.5 m. Sin embargo, los criterios mencionados para tierras agrícolas en Holanda aplicados en fórmulas de drenaje

para el caso de flujo estacionario no refleja la situación promedio. Al contrario, es una situación que ocurre con una frecuencia de 1 a 2 veces al año (WESSELING, 1969). En promedio el nivel freático se mantiene mucho más profundo y la recarga es menor.

En diferentes proyectos de riego en Iraq, un país con un clima cálido y seco, los criterios aplicados dependen de varios factores, como la eficiencia de aplicación y distribución de las aguas de riego, la salinidad del suelo y del agua freática y las características físicas del suelo.

En los diferentes proyectos la descarga promedio varía entre 1 y 2.5 mm/día y la profundidad promedio del nivel freático entre 1.0 y 1.5 m por debajo del nivel del terreno.

En resumen se puede decir que para el diseño de un sistema de drenaje disponemos de varias fórmulas que deben ser alimentados con criterios de drenaje. Estos criterios dependen de las condiciones hidrológicas, agronómicas, del suelo y económicas. Las interrelaciones entre éstas condiciones son muy complicadas. Para expresar la meta de un sistema futuro de drenaje en un solo valor (por ejemplo $\Delta h/q$), debemos considerar un criterio de drenaje nada más que un intento, aunque éste intento debe ser fundado en conocimiento empírico y razonamientos teóricos.

Relación de símbolos

dimensiones

PS	Porcentaje de Saturación (%)	
CE _e	Conductividad Eléctrica medida en el extracto de saturación (mmhos/cm a 25 °C)	
PSI	Porcentaje de Sodio Intercambiable (%)	
CIC	Capacidad de Intercambio Catiónico (meq/100 g de suelo)	
RAS	Relación de Adsorción de Sodio	
pH	Logaritmo negativo de la concentración del H ⁺ -ión	
pF	Logaritmo de la succión de la humedad de suelo	
Y ⁺	Concentración del catión monovalente adsorbido	
Y ⁺⁺	Concentración del catión divalente adsorbido	
C _o ⁺	Concentración del catión monovalente soluble	
C _o ⁺⁺	Concentración del catión divalente soluble	
K _g	Constante de preferencia en la ecuación de GAPON	
q	La recarga o descarga	LT ⁻¹
Q	La descarga de los drenes por unidad de longitud	L ² T ⁻¹
L	La distancia entre los drenes, espaciamiento	L
w _e	La resistencia de entrada	TL ⁻¹
Δh	La pérdida de la carga hidráulica total	L
Δh _h	La pérdida de la carga hidráulica debida a la componente horizontal del flujo	L
Δh _v	La pérdida de la carga hidráulica debida a la componente vertical del flujo	L
Δh _r	La pérdida de la carga hidráulica debida a la componente radial del flujo	L
Δh _e	La pérdida de la carga hidráulica debida a la resistencia de entrada de agua en la zona inmediata al tubo de drenaje y al tubo mismo	L
CH	Conductividad hidráulica del suelo	LT ⁻¹
K	Conductividad hidráulica del suelo	LT ⁻¹
P	Precipitación	L,T ⁻¹
I	Irrigación, aplicación de agua	LT ⁻¹
F _i	Flujo subterráneo que ingresa al área	LT ⁻¹
E _s	Escorrentía superficial	LT ⁻¹
E _t	Evapotranspiración	LT ⁻¹
D	El agua drenada del suelo por el sistema de drenaje	LT ⁻¹
A	El cambio en el almacenamiento de agua en el suelo	LT ⁻¹
Perc	El agua percolada a través del perfil del suelo hacia el agua subterránea	LT ⁻¹
Inf	El agua infiltrada en el suelo	LT ⁻¹

Bibliografía

ALEXIADES, C.A., JACKSON, M.L. (1966): Quantitative clay mineralogical analysis of soils and sediments. Proc.14th Nat.Conf.on Clay and Clay Minerals, Berkeley, Calif., USA.

ALPHEN, J.G.van (1975): Some notes on the reclamation of salt-affected soils in Peru. Paper presented at Int.Conf.on Waterlogging and Salinity, Lahore, Pakistan.

ALVA, C.A. (1971): Balance de agua y de sales en la recuperación de un suelo salino-sódico en el área piloto de drenaje Chacupe, Lambayeque. Tesis. Univ.Nac.Agraria La Molina, Perú.

ASTM (1961): Tentative method for grain size analysis of Soils. The 1961 Book of ASTM Standards. Part 4: 1271-1283.

BEERS, W.F.J.van (1963): The auger-hole method. A field measurement of the hydraulic conductivity of soil below the water table. Bull.1 of the Int.Inst. of Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands.

BEERS, W.F.J.van (1965): Some nomographs for the calculation of drain spacings. Bull.8 of the Int.Inst.for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands.

BEERS, W.F.J.van (1966): The three main functions of a subsurface drainage system. Annual Report 1966 of the Int.Inst.for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands.

BEERS, W.F.J.van (1967): The use of the Penman estimate of evaporation. Tables and Graphs. Unpublished.

BLACK, C.A. (Ed., 1965): Methods of Soil Analysis. Part 1 and 2. Agronomy 9, Am.Soc.of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.

BOUWER, H. (1969): Planning and interpreting soil permeability measurements. J.of the Irr.and Drain.Div.Proc.ASCE. Vol.95:391-402.

BOWER, C.A., HATCHER, J.T. (1962): Characterization of salt-affected soils with respect to sodium. Soil Sci.93:275-280.

CENDRET (1969): II Curso Nacional de Drenaje de Tierras Agrícolas. Dos tomos. Convenio Perú-Holanda. Univ.Nac.Agraria La Molina, Perú.

CENDRET (1970): Area Piloto de Drenaje Chacupe, Lambayeque. Diseño. Inf. Técnico 20. Direcc.Gen.de Aguas e Irrigación, Perú.

CENDRET (1971 a): Area Piloto de Drenaje Chacupe, Lambayeque. Ejecución primera Etapa. Inf.Técnico 29. Direcc.Gen.de Aguas e Irrigación, Perú.

CENDRET (1971 b): Area Piloto de Drenaje Chacupe, Lambayeque. Evaluación preliminar del primer año de recuperación. Inf.Técnico 32. Direcc.Gen.de Aguas e Irrigación, Perú.

CENDRET (1972): Area Piloto de Drenaje la Boya-Camaná. Diseño, Ejecución, Costos, Primeros Resultados. Inf.Técnico 39. Direcc.Gen.de Aguas e Irrigación, Perú.

DIELEMAN, P.J.(Ed., 1963): Reclamation of salt affected soils in Iraq. Publ.11 of the Int.Inst.for Land Reclamation and Improvement, The Netherlands.

FAJARDO, F.A. (1973): Costos de ejecución en dos áreas pilotos de recuperación de suelos de diferente naturaleza de afectación en la Costa Peruana. Tesis. Univ.Nac.Agraria La Molina, Perú.

FAO (1972): Drainage materials. Irr.and Drain. Paper 9.

FAO/UNESCO (1973): Irrigation, Drainage and Salinity. An International source book.

HOFSTEE, J. (1966): Métodos de análisis de suelo, planta, agua y solución de suelo. Manual (en holandés) del Laboratorio. Rijksdienst voor de IJselmeerpolders, Kampen, The Netherlands.

ILRI (1973): Drainage Principles and Applications. Edited from lecture notes of the Int.Course on Land Drainage, Wageningen. Publ.16 (4 Vols.) of the Int.Inst.for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands.

LUTHIN, J.N. (1957): Drainage of Agricultural Lands (traducido en español). Agronomy 7. Am.Soc.of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.

MINISTERIO DE AGRICULTURA (1972): Estudio agrológico detallado de los valles Chancay-La Leche, Lambayeque. Direcc.Gen.de Aguas e Irrigación, Perú.

OOSTERBAAN, R.J. (1975): Interception drainage and drainage of sloping lands. Bull.of the Irr.Drain. and Flood Control Research Council, Pakistan. Vol.5, No.1.

ORE, H.E. (1972): Estudio de subsuelo con fines de drenaje en el Area Piloto de Chacupe, Lambayeque. Tesis. Univ.Nac.Agraria La Molina, Perú.

PEARSON, G.A. (1960): Tolerance of crops to exchangeable sodium. USDA Inf.Bull.216.

PETERSEN, G. (1956): Hidrogeología del río Chancay-Lambayeque. Bol.Soc. geol.Perú.

RICHARDS, L.A. (Ed., 1954): Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. Traducido en Español. Agric.Handbook 60, USDA.

SALZGITTER INDUSTRIEBAU G.m.b.H. (1963): Geología e Hidrología de la zona de Irrigación de Chiclayo, Lambayeque-Valle Nuevo. Tomo A: Memoria Descriptiva-Proyecto Tinajones. Min.de Fomento y Obras Públicas, Perú.

SCHILFGAARDE, J.van (Ed., 1974): Drainage for Agriculture. Agronomy 17. Am.Soc.of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.

SUDRET (1973): Area Piloto de Chacupe-Lambayeque. Inf.sobre el cultivo de arroz, Octubre 1972-mayo 1973. Direcc.Gen.de Aguas, Perú.

SUDRET (1974): Evaluación de los problemas de drenaje y salinidad en el valle de los ríos Chancay-La Leche, Lambayeque. En preparación. Direcc.Gen.de Aguas, Perú.

STAKMAN, W.P. et al. (1969): Determination of soil moisture retention curves. I and II. Inst.for Land and Water Management Research, Wageningen, The Netherlands.

TALSMA, T., FLINT, S.E. (1958): Some factors determining the hydraulic conductivity of subsoils with special reference to the drainage problems. Soils Sci.85:198-206.

UNESCO (1970): Technical Report of UNDP Project Tunisia 5 "Research and Training on Irrigation with saline water."

VASCONCELLOS, S. (1971): Influencia de las sales solubles, materia orgánica y carbonato de calcio en el análisis textural. Tesis. Univ.Nac.Agraria La Molina, Perú.

WESSELING, J. (1969): Storage factor and drainage criterion. En holandés y resumen en inglés. Publ.118 of the Inst.for Land and Water Management Research, Wageningen, The Netherlands.

LIST OF AVAILABLE PUBLICATIONS

PUBLICATIONS

- (3/F) Erich H. Jacobi, *Remembrement en Europe*. 1959. 152 pp.
- (3/D) Erich H. Jacobi, *Flurbereinigung in Europa*. 1961. 157 pp.
- (6) A priority scheme for Dutch land consolidation projects. 1960. 84 pp.
- (7) An assessment of investments in land reclamation from the point of view of the national economy. 1969. 65 pp.
- (8) F. Hellinga, *Local administration of water control in a number of European countries*. 1960. 46 pp.
- (9) L. F. Kamps, *Mud distribution and land reclamation in the eastern Wadden Shallows*. 1963. 91 pp.
- (11) P. J. Dieleman, etc. *Reclamation of salt affected soils in Iraq*. 1963. 175 pp.
- (12) C. H. Edelman, *Applications of soil survey in land development in Europe*. 1963. 43 pp.
- (13) L. J. Pons, and I. S. Zonneveld. *Soil ripening and soil classification*. 1965. 128 pp.
- (14) G. A. W. Van de Goor, and G. Zijlstra. *Irrigation requirements for double cropping of lowland rice in Malaya*. 1968. 68 pp.
- (15) D. B. W. M. van Dusseldorp, *Planning of service centres in rural areas of developing countries*. 1971. 159 pp.
- (16) *Drainage principles and applications*. Vols I/IV (1972-1974). 1455 pp.
- (17) *Land evaluation for rural purposes*. 1973. 116 pp.
- (19) M. G. Bos, and J. Nugteren. *On irrigation efficiencies*. 1974. 89 pp.
- (20) M. G. Bos, *Discharge Measurement Structures*. 1976. 450 pp.

BULLETINS

- (1) W. F. J. van Beers. *The auger hole method*. 1958. 32 pp. Rev. offprint 1970.
- (1/D) W. F. J. van Beers. *Die Bohrloch-Methode*. 1962. 32 pp.
- (3) W. F. J. van Beers. *Acid Sulphate Soils*. 1962. 31 pp.
- (4) B. Verhoeven. *On the calciumcarbonate content of young marine sediments*. 1963. 27 pp.
- (5) P. J. Dieleman and N. A. de Ridder. *Studies of salt water movement in the Bol Guini Polder, Chad Republic*. 1964. 40 pp.
- (6) A. J. de Groot. *Mud transport studies in coastal waters from the western Scheldt to the Danish Frontier*. 1964.
- (7) *Code of practice for the design of open watercourses and ancillary structures*. 1964. 80 pp.
- (8/F) W. F. J. van Beers. *Quelques nomogrammes pour le calcul des espacements des drains*. 1966. 21 pp.
- (9) D. J. Shaw. *The managil South-Western extension to the Gezira Scheme*. 1965. 37 pp.
- (10) F. Homma. *A viscous fluid model for demonstration of groundwater flow to parallel drains*. 1968. 32 pp.
- (11) G. P. Kruseman, and N. A. de Ridder. *Analysis and evaluation of pumping test data*. 1970. 2nd ed. 200 pp.
- (11/F) G. P. Kruseman, and N. A. de Ridder. *Interpretation et discussion des pompages d'essai*. 1973. 2nd ed. 213 pp.
- (11/S) G. P. Kruseman, and N. A. de Ridder. *Análisis y evaluación de los datos de ensayos por bombeo*. 1975. 212 pp.
- (12) J. G. van Alphen, and F. de los Rios Romero. *Gypsiferous soils*. 1971. 44 pp.
- (13) J. H. Edelman. *Groundwater hydraulics of extensive aquifers*. 1972. 216 pp.
- (14) Ch. A. P. Takes. *Land settlement and resettlement projects*. 1975. 44 pp.
- (15) W. F. J. van Beers. *Computing drain spacings*. 1976. 47 pp.
- (16) C. A. Alva, J. G. van Alphen et al. *Problemas de drenaje y salinidad en la Costa Peruana*. 1976. 116 pp.

BIBLIOGRAPHIES

- (4) L. F. Abell, and W. J. Gelderman. *Annotated bibliography on reclamation and improvement of saline and alkali soils*. 1964. 59 pp.
- (5) C. A. de Vries, and B. C. P. H. van Baak. *Drainage of agricultural lands*. 1966. 28 pp.
- (6) J. G. van Alphen, and L. F. Abell. *Annotated bibliography on reclamation and improvement of saline and sodic soils*. (1966-1960). 43 pp.
- (7) C. A. de Vries. *Agricultural extension in developing countries*. 125 pp.
- (8) C. J. Brouwer, and L. F. Abell. *Bibliography on cotton irrigation*. 1970. 41 pp.
- (9) S. Raadsma, and G. Schrale. *Annotated bibliography on surface irrigation methods*. 1971. 72 pp.
- (10) R. H. Brook. *Soil survey interpretation*. 1975. 64 pp.
- (11) *Land and water development*. 1975. 80 pp.
- (12) *Land and water development*. 1976. 96 pp.

ANNUAL REPORTS free of charge

Information about exchange and sale of ILRI publications can be obtained from:

INTERNATIONAL INSTITUTE FOR LAND RECLAMATION AND IMPROVEMENT/ILRI
P.O. BOX 45 - WAGENINGEN/THE NETHERLANDS

