

## ÍNDICE

<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>5</b>
<b>2 PRINCIPALES LINEAMIENTOS SOCIO ECONÓMICOS GENERALES</b>	<b>6</b>
<b>3 CLIMATOLOGÍA</b>	<b>9</b>
<b>4 OROGRAFÍA , HIDROGRAFÍA Y GEOMORFOLOGÍA</b>	<b>11</b>
<b>5 LINEAMIENTOS GEOLÓGICOS Y TECTÓNICOS</b>	<b>13</b>
5.1 Geología	13
5.2 Tectónica	17
<b>6 ACTIVIDADES DE CAMPO Y ESTUDIOS</b>	<b>18</b>
6.1 Actividades preliminares	18
6.1.1 Colección de los datos y recopilación de antecedentes	18
6.1.2 Inventario de puntos de agua	23
6.2 Base de datos y Sistema de Información Geográfica (SIG)	27
6.2.1 Realización de una base de datos	27
6.2.2 Implementación de un sistema de información geográfica	28
6.3 Piezometría	31
6.3.1 Campañas piezométricas	31
6.3.2 Determinación de las coordenadas plano-altimétricas de puntos de agua	33
6.3.3 Levantamiento taquimétrico de puntos de agua	35
6.4 Hidroquímica e intrusión marina	37
6.4.1 Muestreo y análisis para la calidad de las aguas	37
6.4.2 Muestreo y análisis isotópicas	39
6.4.3 Muestreo y análisis para la potabilidad	39
6.4.4 Muestreo y análisis para aguas minerales y minero-medicinales	42
6.4.5 Control de la salinidad y de la intrusión marina	42
6.5 Geofísica	43
6.5.1 Objetivos de las campañas geofísicas	43
6.5.2 Cantidades previstas y ejecutadas	43
6.5.3 Metodologías de prospección y de interpretación utilizadas	43
6.5.4 Equipos utilizados	46
6.5.5 Interpretación de los resultados	46
6.6 Realización de sondeos de exploración y de ensayos de bombeo	49
6.6.1 Realización de sondeos de exploración	49
6.6.2 Realización de ensayos de bombeo	51

<b>6.7 Integración de la red meteorológica existente</b>	<b>53</b>
<b>6.8 Hidrología</b>	<b>54</b>
6.8.1 Campañas de aforos en los ríos y canales	54
6.8.2 Instalación de regletas hidrométricas	55
6.8.3 Evaluación de la recarga	55
6.8.4 Estudios hidrológicos - modelización lluvia-escorrentía	56
<b>6.9 Agronomía - Edafología</b>	<b>59</b>
6.9.1 Campaña agronómica y edafológica	59
6.9.2 Identificación zonas con regadío actual y de zonas potencialmente regables	60
<b>6.10 Evaluación de la utilización del agua</b>	<b>65</b>
6.10.1 Instalación de contadores volumétricos	65
6.10.2 Balances hídricos aguas subterráneas	66
6.10.3 Balances hídricos aguas superficiales	67
<b>6.11 Cartografía temática</b>	<b>69</b>
6.11.1 Realización de cartografía hidrogeológica	69
6.11.2 Realización de cartografía de vulnerabilidad	70
<b>6.12 Modelización</b>	<b>80</b>
6.12.1 Modelos matemáticos de flujo de las aguas subterráneas	80
6.12.2 Utilización conjunta de las aguas subterráneas y superficiales	82
<b>7 RESULTADOS OBTENIDOS</b>	<b>83</b>
<b>7.1 Acuíferos y aguas subterráneas</b>	<b>83</b>
7.1.1 Caracterización hidrogeológica de las diferentes formaciones geológicas	83
7.1.2 Pozos, sondeos y manantiales	85
7.1.3 Piezometría	86
7.1.4 Calidad de las aguas subterráneas - caracterización hidroquímica	88
7.1.5 Salinidad e intrusión marina	90
7.1.6 Resultados análisis isotópicos	90
7.1.7 Relaciones ríos-acuíferos	90
7.1.8 Evaluación de la recarga - infiltración eficaz	91
7.1.9 Modelos matemáticos de flujo	93
7.1.10 Recursos hídricos y reservas hídricas	93
7.1.11 Utilización de las aguas subterráneas	94
7.1.12 Vulnerabilidad	95
<b>7.2 Aguas superficiales</b>	<b>98</b>
7.2.1 Régimen hidrológico y recursos hídricos	98
7.2.2 Utilización de las aguas superficiales	99
7.2.3 Modelos matemáticos lluvia-escorrentía	101
<b>7.3 Agronomía – Edafología</b>	<b>108</b>
7.3.1 Campaña agronómica y edafológica	108
7.3.2 Identificación de zonas con regadío actual	108
<b>8 CANTIDADES EXPLOTABLES DE AGUA</b>	<b>110</b>
<b>9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>112</b>

<b>9.1 Resumen de datos generales y socio-económicos</b>	<b>112</b>
<b>9.2 Clima</b>	<b>113</b>
<b>9.3 Orografía, Hidrografía y Geomorfología</b>	<b>114</b>
<b>9.4 Geología y tectónica</b>	<b>115</b>
9.4.1 Geología	115
9.4.2 Tectónica	115
<b>9.5 Actividades preliminares, base de datos y SIG</b>	<b>117</b>
<b>9.6 Actividades de campo y estudios</b>	<b>119</b>
9.6.1 Monitoreo piezométrico y actividades relacionadas	119
9.6.2 Monitoreo de calidad	120
9.6.3 Monitoreos especiales (isotopos, aguas minero-medicinales, potabilidad)	120
9.6.4 Salinidad de las aguas subterráneas	120
9.6.5 Geofísica	120
9.6.6 Perforación y ensayos de bombeo	121
9.6.7 Integración de la red meteorológica existente	123
9.6.8 Campañas de aforos directos e instalación regletas hidrométricas	124
9.6.9 Actividades agronómicas y edafológicas	125
9.6.10 Evaluación de la utilización del agua - Balance hídrico	127
9.6.11 Cartografía temática	128
9.6.12 Modelización aguas subterráneas	129
9.6.13 Modelización aguas superficiales	130
<b>9.7 Resultados obtenidos</b>	<b>131</b>
9.7.1 Caracterización hidrogeológicas de las diferentes formaciones geológicas y acuíferos presentes	131
9.7.2 Pozos, sondeos y manantiales	131
9.7.3 Piezometría	132
9.7.4 Calidad de las aguas subterráneas y caracterización hidroquímica	133
9.7.5 Salinidad de las aguas subterráneas	133
9.7.6 Resultados análisis isotópicos, edad de las aguas y zonas de recarga	133
9.7.7 Relaciones ríos-acuíferos	134
9.7.8 Evaluación de la recarga - infiltración eficaz	135
9.7.9 Vulnerabilidad	136
9.7.10 Modelos matemáticos de flujo de las aguas subterráneas	136
9.7.11 Recursos hídricos y reservas hídricas subterráneas	137
9.7.12 Régimen hidrológico y recursos hídricos superficiales	138
9.7.13 Identificación de zonas con regadío actual y potencialmente regables - Evaluación de las necesidades hídricas para el riego	140
9.7.14 Utilización de las aguas subterráneas	141
9.7.15 Utilización de las aguas superficiales	142
9.7.16 Modelos matemáticos lluvia-escorrentía	144
9.7.17 Cantidades explotables de agua	146
<b>9.8 Recomendaciones</b>	<b>147</b>
<b>FIGURAS</b>	<b>153</b>
<b>TABLAS</b>	<b>154</b>



## 1 INTRODUCCIÓN

Este informe presenta las actividades, las elaboraciones y los resultados del proyecto Estudio Hidrogeológico Nacional en la zona denominada “Valle de San Juan”, conforme al capítulo 6 de los Términos de Referencia y a los acuerdos y decisiones tomadas en el curso de la realización del estudio.

El área de estudio (ver Fig. 1/1), comprendida entre 18° 37' 22" y 19° 07' 30" de Latitud Norte y entre 71° 03' 07" y 71° 53' 19" de Longitud Oeste, tiene una superficie de aproximadamente 2,568 Km<sup>2</sup>.

En el capítulo 2 se resumen los principales lineamientos socio económicos generales.

En el capítulo 3 se describen las características climatológicas del área, en el capítulo 4 la orografía, hidrografía y geomorfología, y en el capítulo 5 los lineamientos geológicos y tectónicos.

En el capítulo 6, por cada disciplina/método aplicado, se hace un amplia tratación de las actividades de campo y de oficina llevadas a cabo desde el inicio del proyecto, incluyendo los métodos utilizados para las elaboraciones y las interpretaciones de los datos.

En el capítulo 7 se encuentran reunidos todos los resultados alcanzados en los diferentes aspectos/componentes del estudio hidrogeológico.

En el capítulo 8 se indican de forma clara y lineal las cantidades de agua subterránea y/o superficial explotables para satisfacer a las demandas de los diferentes sectores / tipos de usuario.

En el último capítulo, el 9, se reúnen las conclusiones del estudio y las recomendaciones incluyendo la indicación de futuros proyectos a desarrollar para un manejo correcto de los recursos hídricos disponibles, garantizando un desarrollo que sea sostenible en relación con dichos recursos.

El proyecto inició el 14 de Mayo de 1997 y se ha concluido en Febrero 2000 con la entrega de los informes finales. Para la redacción de este informe, se han tomado en cuenta los datos disponibles al 30.09.1999.

## 2 PRINCIPALES LINEAMIENTOS SOCIO ECONÓMICOS GENERALES

Los datos presentados en este capítulo fueron tomados de diferentes documentos oficiales de la República Dominicana (ver bibliografía), eventualmente puestos al día utilizando las tasas de crecimiento indicadas en los documentos mismos para cada tipología de datos.

La zona estudiada está dividida entre las provincias de San Juan, de Elias Piña y parcialmente de Azua: El área de estudio comprende totalmente o parcialmente el territorio de los municipios de Elias Piña, El Llano, Bánica, Pedro Santana, San Juan de la Maguana, Las Matas de Farfán, Juan de Herrera, El Cercado, Bohechio y Las Yayas de Viajama.

La población de estos municipios se estima hoy como está indicado en la siguiente tabla:

<b>Municipio</b>	<b>Habitantes</b>
Elias Piña	25,457
Bánica	9,306
El Llano	9,675
Pedro Santana	9,475
San Juan	149,191
Bohecho	12,193
El Cercado	30,224
Juan de Herrera	19,352
Las Matas de F.	61,184
Las Yayas de Viajama	13,877

La población total de estos nueve municipios se estima hoy en 339,934 habitantes de los cuales el 60% viven en zonas rurales y el 40% en áreas urbana. Se puede estimar además que la población que vive realmente en el área de estudio representa el 90% de la población total de los nueve municipios. Con este asunto se puede calcular que la población del área de estudio es de aproximadamente 305,940 habitantes de los cuales 157,560 viven en zonas rurales y 148,380 en áreas urbanas (el 51.5% son hombres y 48.5% mujeres).

Por lo que atañe a la instrucción el nivel de alfabetismo se divide así por municipio:

<b>Municipio</b>	<b>% analfabeto</b>
Elias Piña	36.1
Bánica	35.2
El Llano	43.7
Pedro Santana	54.0
San Juan	33.1
Bohecho	37.2
El Cercado	45.8
Juan de Herrera	38.9
Las Matas de Farfán	31.3
Las Yayas de Viajama	41.3

La tasa media de analfabetismo se calcula en un 35.8%.

La población económicamente activa representa el 30.1 % de la población total. La repartición en porcentaje de las categorías ocupacionales está indicada a continuación.

<b>Categoría ocupacional</b>	<b>Repartición en %</b>
Patrón o empleador	3.7
Trabajador por propia cuenta	34.8
Trabajador servicio doméstico del hogar	1.1
Trabajador asalariado	47.8
Trabajador familiar no pagado	12.7

La importancia de las diferentes actividades productivas y de servicios en el área (calculada tomando como parámetro de referencia el número de ocupados por cada sector), puede ser así definida, en orden decreciente:

<b>Actividades productivas</b>	<b>Incidencia en %</b>
Agricultura, silvicultura	58.74
Servicios comunales, sociales y personales	13.81
Comercio y turismo	6.90
Industrias manufactureras	4.38
Construcción	3.18
Transporte y telecomunicaciones	2.70
Estab. financieros, seguros, bienes, inmuebles y servicios prestados a las empresas	0.90
Electricidad, gas y agua	0.26
Explotación de minas y canteras	0.03
Otro	9.10

Las actividades agrícolas son las más importantes del área. En segundo lugar están los servicios locales. Pese a que el turismo en estos últimos años haya crecido mucho en la República Dominicana, este crecimiento no ha aportado un incremento significativo en esta actividad, dado que no hay centros turísticos frecuentados por clientes internacionales en el área. El 6.90% indicado como indicador del área comercial-turística se debe esencialmente, entonces, a la componente comercial. Las actividades industriales, aunque son bastante limitadas, ocupan la cuarta posición por importancia como fuente de ocupación.

A continuación se indican por cada área de producción / servicios, los productos / características principales.

### **Área industrial**

En el territorio incluido en el área del proyecto no hay actividades industriales relevantes, a parte de algunas relacionadas con la industria alimenticia.

### **Área agrícola y ganadera**

En el territorio incluido en el área del proyecto, las principales producciones son las siguientes:

Productos agrícolas: Sobre todo Arroz y Habichuelas. Presentes también Tomates, Batatas, Yuca, Guandules y Maíz.

Productos ganaderos: esencialmente Vacunos

### **Área de la pesca**

Siendo una zona interna, no existe actividad pesquera marina. En la zona del embalse de Sabana Yegua se se pescan esencialmente carpas y tilapias.

### **Área turística**

No hay prácticamente desarrollo turístico.

Por lo que atañe al turismo ambiental, no está desarrollado. En el sector norte del área de estudio, se encuentra el margen Sur del Parque José del Carmen Ramírez.

### **Área minera / extractiva**

A parte de la extracción de material para la construcción (esencialmente concentrada en los ríos), las actividades en esta área son muy reducidas. Se extrae un poco de carbón en el sector Norte de la provincia de Elías Piña.

### **Área de infraestructuras y servicios**

La red de carreteras, es de calidad media en el área y no está muy desarrollada. La única carretera en buen estado es la principal Azua - San Juan - Elías Piña.

En el área de estudio no se encuentran aeropuertos.

La distribución de electricidad es muy carente tanto en las áreas urbanas, como en las zonas rurales, donde el servicio no alcanza todos los pueblos.

El servicio telefónico no alcanza la calidad presente en otras partes del país. La cobertura celular es muy reducida.



### 3 CLIMATOLOGÍA

Para el desarrollo del análisis de las características climáticas del área de interés (Valle de San Juan y cuenca alta del río Yaque del Sur), se tomaron en consideración los datos básicos medidos en 35 estaciones, a saber en:

- 21 estaciones pluviométricas/gráficas del INDRHI (período 1961-1996);
- 10 estaciones climatológicas del INDRHI (período 1967-1996);
- 2 estaciones climatológicas de la ONAMET (período 1961-1990);
- 2 estaciones climatológicas de la ONAMET (período 1939-1997);

Los datos climáticos básicos fueron facilitados en base temporal diaria (INDRHI, y ONAMET) y mensual (ONAMET) y necesitaron de una verificación y depuración larga y cuidadosa para llegar a una información confiable para los sucesivos análisis y elaboraciones.

Las características principales del clima se pueden así sintetizar (para mayores detalles, refiérase al Anexo Memorias n° 1):

- el promedio de lluvia anual de la zona hidrogeológica del Valle de San Juan es de 1077 mm (sector de San Juan: 967 mm; sector de Macasía-Tocino: 1174 mm), a nivel de estación los valores anuales medios oscilan entre 571 mm (Villarmando) y 2179 mm (Gajo de la Lagunita), en el sector occidental (cuencas del río San Juan y cuenca alta del río Yaque del Sur), y entre 879 mm (Pozo Hondo) y 2024 mm (Naranjito), en el sector oriental (cuencas de los ríos Macasía y Tocino);
- el territorio de interés está caracterizado por una elevada variabilidad espacial y temporal de la precipitación y no hay correlación con la altura ni entre estaciones cercanas;
- la variación mensual de la precipitación presenta un régimen de tipo bimodal con época lluviosa en la primavera (en términos generales en el mes de mayo) y en verano-otoño (desde agosto hasta noviembre) y con sequía en el invierno y en julio. Pero si la marcha intranual está bastante homogénea en todo el territorio examinado, los meses máximos y mínimos relativos tienen una elevada variabilidad de un lugar al otro, y también entre estaciones bastante cercanas;
- las áreas más lluviosas se localizan en términos generales en la Cordillera Central y en la Sierra de Neiba; las más secas en las zonas llanas del Valle, en particular en el sector occidental cerca del río Yaque del Sur (Villarmando) y en la cuenca del río Los Baos (Vallejuelo);
- se ha verificado, por las series históricas de la lluvia anual, como representativo a escala regional, el modelo logarítmico-normal por sus mejores resultados absolutos y relativos respecto a los modelos normal-Gauss y gamma-Pearson II (aplicación del test de  $\chi^2$  al nivel de significación del 95%);
- en el área hidrológica del Valle de San Juan el coeficiente de variación CV de la lluvia total anual asume, en sentido estadístico, el mismo valor en toda el área, es decir CV = 0.196 (el más bajo de toda el área hidrológica del proyecto);

- la temperatura media del aire presenta valores anuales que fluctúan entre menos de 19 °C y más de 26 °C, sector de San Juan, y entre menos de 20 °C y más de 25 °C, sector de Macasía-Tocino. La variación intranual de la temperatura media oscila entre 3 y 4 °C, y, en todo el área de estudio, el período de mayores temperaturas corresponde a los meses de julio a agosto y lo de mínima a los meses de diciembre - febrero;
- los valores de la evaporación de tanque A medidos oscilan entre 1500 mm (Constanza) y 2450 mm (Matayaya), todos los meses presentan valores elevados de la evaporación. Debido reducido numero y heterogéneidad de los meses de medida completa de la evaporación, las medidas de evaporación utilizadas en el estudio, que en algunas estaciones llegan ciertamente a valores mensuales y anuales subestimados, tienen el sentido de indicación de la magnitud del fenómeno y, sobre todo, de su marcha.
- la ecuación de Hergreaves-Samani ha sido elegida como método de referencia para evaluar la evapotranspiración potencial ET<sub>Po</sub> por que tiene, a escala de toda el área de estudio del Caribe, el mejor ajuste, en sentido relativo, con la marcha mensual de los valores de la evaporación de tanque A (EPan). Todavía a escala local pueden tener más validez otros métodos, como por ejemplo eso de Turc y/o de Blaney-Criddle.
- la distribución de la ET<sub>Po</sub> anual tiene una cierta correlación con las características morfológicas, el promedio anual de la zona hidrogeológica del Valle de San Juan es de 1679 mm (sector de San Juan: 1656 mm; sector de Macasía-Tocino: 1701mm), a nivel de estación los valores anuales medios oscilan entre 1385 mm (Constanza) y más de 1800 mm (San Juan de la Maguana, Elias Piña, El Cercado y Las Matas de Farfán);
- el balance entre la precipitación media anual y la ET<sub>Po</sub> (de Hergreaves-Samani) llega a encontrar las áreas más secas, donde se señala un déficit hídrico alrededor de todo el año, en el sector sur de la cuenca del río San Juan y alrededor de Las Matas de Farfán. En cambio, las áreas húmedas se encuentran en las zonas intramontanas y de sierra, ocurriendo períodos húmedos hasta 4-7 meses.

#### **4 OROGRAFÍA , HIDROGRAFÍA Y GEOMORFOLOGÍA**

Los elevados relieves de la Cordillera Central que constituyen la ladera N de la cuenca, son extremadamente abruptos, con asperezas mayores en correspondencia de las vulcanitas cretáceas. Una morfología levemente diferente se observa en los relieves calcáreos de la dorsal Loma San Francisco – Loma de Pico Prieto y en la Loma El Muñeco que, aun presentando vertientes de elevada pendiente, muestran generalmente una parte apical más bien suavizada. En las mesetas apicales de la Loma El Muñeco se observan en las fotos aéreas numerosas macroformas kársticas, no encontradas en los otros relieves calcáreos de toda el área de estudio.

Siempre en la ladera septentrional, resulta llamativa la respuesta morfológica a la presencia de la estructura compresiva que se desarrolla desde Pedro Santana hasta el embalse de Sabaneta, con la forma de una quebrada con valle de laderas extremadamente abruptas.

En la ladera meridional resulta particularmente evidente el control estructural ejercido en el desarrollo orográfico de este sector, en el cual los valles principales y los relieves, generalmente en forma de dorsales alargadas, muestran una estrecha correspondencia con los ejes de anticlinal y sinclinal.

La franja situada a los pies de la Sierra de Neiba presenta un relieve de tipo de lomas bajas fuertemente controlado por la disposición estratigráfica de las formaciones neogénicas que caracterizan a esta franja. La inmersión general NNE de la estratificación, junto con los efectos de la erosión selectiva, determina la formación de crestas muy estrechas que a veces persisten con continuidad también por numerosos kilómetros.

En el sector oriental la transición de esta unidad morfológica a los relieves calcáreo margosos y eo-miocénicos ocurre mediante interposición de una zona llana desarrollada según una franja de aproximadamente un kilómetro de ancho.

En la zona de expansión de los cursos de los torrentes, la franja situada a los pies de la montaña está caracterizada por el desarrollo de conoides de deyección, actualmente inactivos, y a veces en avanzado estado de desmantelamiento, que presentan generalmente un alto gradiente morfológico.

La parte central de la cuenca está representada por un extenso valle axial, de vario grado de articulación, delimitado por amplios sectores de lomas, constituidas generalmente por los sedimentos continentales de la formación Arroyo Seco; en correspondencia de esta última se desarrolla a menudo un retículo isótropo de tipo dendrítico de densidad generalmente medio-alta.

El desarrollo de los valles aluviales se reduce consistentemente en el sector occidental del área de estudio, donde, procediendo hacia el río Artibonito, se observan extensiones siempre mayores de las áreas con lomas.

En la ladera meridional de la llanura aluvial del río San Juan, exactamente entre el cruce para Yabonico y el pequeño pueblo de El Botado, está presente una franja de amplios conoides aluviales, coalescentes y con superficies poco inclinadas, que degradan en progresión en los depósitos de cojín aluvial. La génesis de estos depósitos parece estar vinculada con la presencia de la estructura frágil que delimita hacia el S su desarrollo y que, interviniendo como escarpadura morfológica, parece haber favorecido su formación.

Los ríos principales del área presentan un curso meandriforme delimitado predominantemente por terrazas aluviales o, como en el trecho más oriental del río San Juan, con corrimiento encauzado entre orillas constituidas por terrenos neogénicos, con llanuras apicales a menudo cubiertas por fracciones aisladas de material aluvial.

La parte central de la cuenca, entre el río San Juan y el río Yacahueque, está caracterizada morfológicamente por la presencia de estructuras lávicas tabulares delimitadas por escarpaduras subverticales.

Tanto aislados (Cerro Los Barreros y otros) como emergidos sobre las expansiones lávicas (Cerro Indio y otros), se ven bien numerosos edificios volcánicos.

La presencia contemporánea de aparatos volcánicos distintos y de extensos cuerpos tabulares, es indicativa de un vulcanismo cuaternario compuesto caracterizado tanto por actividad de tipo fisural, con emisión de lavas de alta fluidez; como por actividad de tipo central. Las relaciones entre las formas volcánicas deja imaginar un trend evolutivo de los productos emitidos hacia términos de viscosidad más alta.

La hidrografía del valle de San Juan individualiza claramente la separación entre una sub-área oriental y una occidental. La separación entre las dos se encuentra según un alineamiento NS en proximidad de los pueblos de Las Charcas de María Nova y Pedro Corto y se extiende a lo largo de los depósitos basálticos, inmediatamente al N.

El sector oriental está caracterizado por el río San Juan y por una serie de afluentes perennes, como los ríos Jinova y Mijo. El río San Juan llega directamente desde el N del embalse de Sabaneta, y continúa con una marcha casi NS hasta la ciudad de San Juan. Aguas abajo de esta última, la marcha se modifica de manera importante, continuando en dirección ESE a lo largo de una gran estructura tectónica, que se encuentra a nivel regional. Los otros ríos se extienden desde la Cordillera Central al N con dirección predominante y llegan directamente al río San Juan. En la extremidad oriental del área de estudio, en un sector ya separado del área de interés (la llanura de San Juan), se encuentra también el río Yaque del Sur y el gran embalse de Sabana Yegua. Otros ríos, en la mayor parte arroyos y cañadas secas, se encuentran en toda la sub-área, pero el elemento de mayor interés sin duda es la característica general de sequía de la parte S de la llanura desde la gran estructura tectónica que limita al río San Juan hasta las primeras áreas montañosas al S. Todos los ríos confluyen en el río San Juan y este último en el río Yaque del Sur aguas abajo del embalse de Sabana Yegua.

El sector occidental, desde el divisorio principal de las aguas subterráneas hasta el límite con Haití, está caracterizado por un sistema de drenaje que confluye en el río Macasía. Entre otros, se encuentran el arroyo La Celibe (desde el límite oriental de la sub-área), los ríos Los Naranjos, Caño y Comendador en el lado S, y los ríos Yabonico y Yacahueque en el lado N. Cañadas secas y arroyos se encuentran en gran número en todo el sector de interés. En el sector N, en proximidad de las rocas de la Cordillera Central, un valle aislado (ver el divisorio de aguas subterráneas y superficiales con marcha EO en el mapa) sube al sistema del río Artibonito, que delimita también el límite de estado con Haití.

## 5 LINEAMIENTOS GEOLÓGICOS Y TECTÓNICOS

### 5.1 Geología

Partiendo de los términos más antiguos, el cuadro litoestratigráfico de los terrenos que afloran en el área de estudio es el siguiente.

#### **Terrenos cretáceos y paleogénicos**

Constituyen los relieves que delimitan el valle de San Juan.

En la ladera septentrional afloran, en contacto tectónico, tanto las rocas pertenecientes a las formaciones predominantemente volcánicas de la Cordillera Central como los terrenos que pueden remontarse a las cuencas sedimentarias eocénicas. Parte de los relieves están constituidos también por rocas calcáreas eocénicas, que en la parte meridional, junto con las secuencias calcáreo margosas de la formación Sombrerito, constituyen el esqueleto de la Sierra de Neiba.

En detalle, las unidades representadas en el área de estudio son:

#### Complejo del Tireo (k'mgm)

Aflora exclusivamente en los relieves ubicados al NE del área de estudio y está constituido por piroclastitas de composición ácida e intermedia, además de vulcanitas de igual composición.

Están presentes también calizas y masas dacíticas y riódacíticas.

La formación está atribuida genéricamente al cretáceo.

#### Grupo de Peralta (ks-tol'FI)

Representa difusamente los relieves ubicados al N y al E del área.

Este grupo atribuido al Eoceno inferior, ya descrito para el área de Baní, está constituido por rocas flyshoides arenáceo-siltíticas y secuencias calcáreas predominantemente en facies detrítica, pertenecientes a formaciones distintas en la secuencia sedimentaria.

#### Formación de Neiba (teo-tol'c; teo-tmii'c)

Está constituida principalmente por calizas de color claro, de micríticas a cristalinas, a pedernales, en sucesiones bien estratificadas con estratos de espesor decimétrico. En el mapa se ha mantenido la distinción entre los afloramientos septentrionales y los meridionales que, si desde un punto de vista estrictamente litológico no presentan diferencias relevantes, resultan distintos en la edad de cierre, siendo el techo de la secuencia más joven en la parte meridional.

La base de la formación está datada para ambas zonas en el Eoceno.

Amplias formas de disolución kárstica se observan sólo en la parte apical de la Loma El Muñeco, en estrecha correlación con el desarrollo de la fracturación.

Los espesores que se estiman para esta formación son del orden del millar de metros.

En correspondencia de la Loma La Muñeca y en el borde septentrional del Graben de San Juan, la formación está dominada por un centenar de metros de un depósito volcánico s.l. fuertemente alterado (**tol s-v**) atribuido al Oligoceno superior.

#### **Depósitos neogénicos**

También en esta área afloran abundantemente terrenos que pueden remontarse a la misma secuencia sedimentaria neogénica presente tanto en la cuenca de Azua como en la de Neiba.

En la ladera meridional de la cuenca esta sucesión resulta ser continua en todos sus términos, mientras que en el lado N, donde la descompaginación tectónica no siempre permite la verificación de tal continuidad, se señalan lagunas en la secuencia de depósito (sinclinal al E de Baníca) para las cuales sería necesaria una verificación más profunda de confirmación.

Partiendo de la posición estratigráfica más baja, las formaciones que constituyen la secuencia son las siguientes:

#### *Formación Sombrero (tmii'c)*

En esta área la formación está representada predominantemente por margas a las que se intercalan con frecuencia variable, pero siempre subordinadamente, estratos calcareníticos generalmente graduados.

La estimación efectuada en la zona de la Sierra de Neiba hace considerar que el espesor de la formación pueda ser del orden del millar de metros.

Esta formación, atribuida al Mioceno inferior, domina sin discordancias visibles a la Formación de Neiba.

En el límite NE del área, en las cercanías de la presa de Sabaneta, están presentes afloramientos de conglomerados de diferente tipología agrupados en una unidad que en trabajos anteriores ha sido definida como *Mioceno Conglomerático Indiferenciado (tmi'cg)*.

Cuando están presentes estos conglomerados, constituidos por guijarros y cantos tanto calcáreos (tipo "Neiba") como arenáceos, se colocan estratigráficamente entre los terrenos de la Formación Sombrero y los de la Formación Trinchera.

Se ha mantenido distinta esta unidad por la imposibilidad de atribuir razonablemente estos conglomerados a una de las dos formaciones arriba citadas.

#### *Formación Trinchera (tmis'Mm)*

Los litotipos que la constituyen son predominantemente mudstone, siltitas y areniscas, con conglomerados subordinados, en sucesión bien estratificada.

En esta área no está presente la Formación Quita Coraza como, en cambio, lo está en las cuencas de Azua y Neiba.

#### *Formación Arroyo Blanco (tpl'MI)*

Representa la formación estratigráficamente más alta entre las de ambiente marino.

Su espesor es de alrededor de 700 m y está constituida por una secuencia sedimentaria de carácter regresivo generalmente caracterizada por una porción inferior dominada por las siltitas con presencia de corales, y por una porción superior dominada por conglomerados y areniscas.

Esta formación constituye el depósito en un ambiente marino poco profundo y deltaico fluvial.

#### *Formación Arroyo Seco (tpl-qp'Mc)*

Conocida también como Formación Via, esta formación de ambiente continental, que aflora extensamente también en la parte central del valle, representa la fase de cierre de la cuenca sedimentaria neogénica.

Está constituida por guijarros, cantos en matriz fina, arenas, limos y arcillas, generalmente sueltos o con bajo grado de cementación.

La formación resulta más bien heterogénea en su composición, con variaciones también marcadas desde facies de depósito en las que predominan litotipos de granulometría fina hasta depósitos espesos de naturaleza exclusivamente guijarrosa, como se observa al N

de Guanito.

### **Melange tectónico**

Entre el río San Juan y el río Yaque del Sur, a lo largo de la franja de tectonización que desde El Coco llega hasta la Presa de Sabaneta, por un ancho del orden de algunos kilómetros, aflora una brecha tectónica heterogénea (**'Mel**) constituida por litotipos de las formaciones precámbricas. También la textura resulta ser variable, presentando tanto facies cataclásticas como paquetes espesos de estratos de bajo grado caótico.

Las masas más amplias, a menudo cartografiables, están representadas por bloques que pueden medir hasta un kilómetro remantados a la Formación calcárea de Neiba.

La edad de los terrenos afectados por los movimientos tectónicos que dieron origen a este melange, permiten datar genéricamente la formación de esta brecha en el Terciario-Cuaternario.

### **Vulcanitas cuaternarias**

Rocas vinculadas con el vulcanismo cuaternario, de composición basáltica (**q'b**) y trend de diferenciación hacia productos subsaturados, están presentes extensamente en la parte central del valle, entre el río Yabonico y el río San Juan.

La colocación de estas vulcanitas es predominantemente tabular, con relieves aislados en correspondencia de los aparatos volcánicos de emisión.

El sustrato está representado generalmente por la formación clástica continental Arroyo Seco.

### **Depósitos Cuaternarios**

Amplios afloramientos de sedimentos cuaternarios están presentes tanto en el valle como en las áreas a los pies de la montaña.

Depósitos de origen fluvial cubren abundantemente el valle de San Juan y presentan generalmente una granulometría variable desde las arenas limosas hasta los guijarros gruesos.

Sobre la base de las características morfológicas y de la relación con la red hidrográfica, los depósitos han sido diferenciados entre aluviones actuales (**qh'a**), y depósitos fluviales (**q'f**), a menudo aterrizados, tanto recientes como antiguos.

Amplias franjas de depósitos actuales cubren por extensas áreas la parte mediana del Valle de San Juan y se presentan predominantemente en forma de depósitos aterrizados, con bordes netos y bien desarrollados, principalmente en la parte oriental (río Mijo y río San Juan).

Estos depósitos no se limitan sólo a las cuencas principales sino que se desarrollan también en valles menores, como el longitudinal presente detrás de la Sierra de Neiba, en el cual está ausente el vínculo con la red hidrográfica actual, y aquél en proximidad de Sabana Cruz. Para los valles mencionados arriba la tectónica reviste un papel relevante en su formación.

En el sector que se encuentra entre Elías Piña y La Estancia hemos encontrado una cierta dificultad en definir la efectiva extensión de los depósitos fluviales que cubren parte de las zonas llanas; la presencia de fracciones de terrenos neogénicos subaflorantes y la coexistencia de depósitos de tipo coluvial rinden simplificada la delimitación cartográfica de estas unidades geológicas, cuya efectiva distribución necesitaría un atento trabajo en el terreno.

En la parte meridional del área están presentes numerosos conoides (**q'ab**), tanto aluviales, como los coalescentes y de bajo gradiente morfológico presentes a lo largo de la Carretera Sánchez, como los de deyección o mixtos, en parte desmantelados por la erosión, que caracterizan a la franja próxima a los relieves de la Sierra de Martín García.

---

En la ladera septentrional estos depósitos resultan, en cambio, limitados a pocos cuerpos de tamaño relevante, como el que se encuentra en correspondencia de La Piedra de Candela y el que está al S de la Loma La Longaniza.  
Depósitos detríticos de vertiente y depósitos genéricamente eluvio-coluviales han sido cartografiados como depósitos cuaternarios indiferenciados (**q'**).



## 5.2 Tectónica

Los terrenos neogénicos presentes en el valle poseen una colocación que define en términos geométricos un sinclinal parcialmente perturbado por la presencia de estructuras plicativas menores (anticlinal de Elías Piña y sinclinal La Cañita) y de estructuras frágiles de dislocación.

La Sierra de Neiba que constituye la ladera S de la cuenca está caracterizada por una serie de sinclinales y anticlinales, a los cuales se asocian fallas de igual orientación que muestran, dudosamente, un carácter de tipo distensivo.

La tectónica extensiva, testimoniada tanto por la presencia de estas fallas como, indirectamente, por el vulcanismo cuaternario manifestado en la parte central del valle, se instauró sucesivamente a la fase comprensiva que determinó el cierre de esta cuenca y el de las análogas cuencas neogénicas de Azua y Neiba.

Los elementos tectónicos que pueden remontarse a esta fase están representados por fallas de gran desarrollo de dirección E-O y ESE-ONO en asociación con fallas de longitud menor en dirección ortogonal, de las cuales la más llamativa es la que flanquea en el lado izquierdo al río Mijo.

La fase compresiva que, como ya se ha recordado, se manifiesta en la ladera meridional en una teoría de anticlinales y sinclinales, en la ladera septentrional se caracteriza, en cambio, por la formación de escamaduras sobrecorridas, delimitadas por fallas inversas de dirección NO-SE en el restante sector oriental.

Las únicas estructuras plicativas evidentes en la ladera septentrional están limitadas aparentemente a los terrenos carbonáticos y margosos de las formaciones de Neiba y Sombrerito (anticlinal de Loma El Muñeco y pliegue-falla de la Loma del Guanito). Las secuencias terrígenas de las formaciones del Grupo de Peralta parecen haber respondido predominantemente con estructuras de tipo frágil a las sollicitaciones inducidas por la fase compresiva arriba mencionada.

Los esfuerzos compresivos alcanzaron una intensidad decididamente elevada en la parte oriental donde se desarrolla una franja de intensa brecha tectónica.

## 6 ACTIVIDADES DE CAMPO Y ESTUDIOS

### 6.1 Actividades preliminares

#### 6.1.1 Colección de los datos y recopilación de antecedentes

Desde mediados de la década de los años sesenta hasta el presente, se han realizado en la República Dominicana, importantes trabajos de investigación en el ámbito de la geología, de la hidrología y de la hidrogeología. En este párrafo se sintetizan los principales que han interesado a todo el territorio nacional y a la Planicie Costera Oriental.

#### **Información a nivel nacional**

#### **Plan Nacional de Investigación, Aprovechamiento y Control de Aguas Subterráneas (Planiacas)**

Tahal Consulting Engineers Ltd/INDRHI, 1983

Es el trabajo más completo que se ha realizado a nivel nacional hasta la fecha, en el área de geología, hidrología e hidrogeología.

Su objetivo básico consistió en estudiar de manera sistemática los recursos hídricos de todo el territorio nacional y establecer las bases institucionales para su aprovechamiento.

En este estudio se dividió el país en catorce unidades hidrogeológicas (Tab. 1.1) y se llegó a la conclusión de que el volumen total de los recursos aprovechables se calculó en unos 1400 a 1500 millones de m<sup>3</sup>/año, de los cuales a la fecha se estaban explotando cerca de 250 millones de m<sup>3</sup>.

Entre otros logros se puede mencionar la actualización del mapa geológico general.

- El informe final está compuesto por siete volúmenes que afrontan las temáticas de calidad de aguas y efluentes existentes en la Rep. Dominicana;
- Glosario; instrucciones para completar los formularios de solicitud de informes detallados y de estadística descriptiva;
- Formularios de estación de la red;
- Decreto 217-91 (Plaguicidas);
- Notas de solicitud de información pertinente al diseño de la red;
- Planillas para estimar los factores de emisión de las industrias principales.

#### **Planificación de la red pluviométrica de la República Dominicana**

INDRHI/GTZ, 1990

Es un informe realizado por la misma misión de GTZ que tenía los objetivos siguientes:

- completar la red pluviométrica en todo el territorio nacional;
- definir los estudios específicos de precipitaciones regionales;
- elaborar una tentativa de programa de trabajo para los problemas hidrometeorológicos más relevantes.

En este informe se pone de manifiesto la existencia de 110 estaciones meteorológicas en todo el país, se recomienda la reinstalación de 19 de éstas y la construcción de otras 33 nuevas para obtener un total de 162.

Al final se presenta una serie de mapas con las regiones meteorológicas, de isolíneas de coeficiente de irregularidad, de estaciones pluviométricas, y un test de homogeneidad para todas las regiones meteorológicas.

#### **Anuario Hidrológico 1988**

INDRHI (Departamento de Hidrología), 1990

Consiste en la recopilación de datos hidrológicos en todo el país, para el año 1988 y consta de tres partes:

- Volumen I Aguas Superficiales;
- Volumen II Aguas Subterráneas;
- Volumen III Calidad de Aguas.

En el primer volumen se presenta la información climatológica y pluviométrica de la red del INDRHI, en el segundo se presenta la información hidrostática e hidrodinámica de la red de pozos de observación de la región sudoeste y en el tercero, se presentan los parámetros físico-químicos de las aguas del país.

### **Evolución en el Conocimiento de las Aguas Subterráneas en la República Dominicana**

Ing. H. Rodríguez (CODIA), 1994

Consiste en un artículo que trata sobre algunos trabajos que se han realizado en el país relativos a las aguas subterráneas desde mediados de la década de los años 60 hasta el año 1994.

En este trabajo también se pueden encontrar algunas consideraciones generales de la geología de la República Dominicana y conceptos generales de hidrogeología.

### **Optimización de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Río Yaque del Sur y Mejoramiento de la Red Hidrométrica Nacional**

PNUD/OMM - PROYECTO DOM/87/004, 1990

El presente informe trata sobre la concepción de la red hidrométrica nacional y fue editado en la fase final del proyecto cuyos objetivos principales fueron:

- fortalecimiento en el manejo y operación del sistema hídrico del río Yaque del Sur;
- establecimiento de una red hidrológica básica necesaria para la planificación futura de los recursos hídricos.

En el curso del proyecto se realizaron las siguientes actividades:

- análisis de la situación general de la red hidrológica nacional y de las prácticas de operación de la misma;
- estudio y análisis de la demanda actual y futura de la información hidrológica básica,
- diseño de la técnica de evaluación de la red hidrológica básica.
- diseño de la red hidrológica básica;
- construcción e instalación de 25 estaciones hidrométricas de primer orden.

### **Intensidades Máximas y Erosividad de las Lluvias en la República Dominicana**

SEA/IICA/INDRHI, 1982

Es un documento dirigido a usuarios del sector agropecuario en el diseño de pequeñas estructuras para el control y conducción de lluvias y para la planificación del uso de las tierras donde se desea reducir el riesgo de erosión por las lluvias.

En dicho documento se presenta la información de lluvias procesada hasta el año 1980. En adición con anexos, se indican los procedimientos utilizados y una metodología convencional para estimar la esorrentía, sobre la base de la información de intensidades de lluvias.

El trabajo consistió en el análisis y procesamiento de los datos de lluvia contenidos en las bandas de los pluviógrafos instalados en el país.

Los resultados presentan por cada evento de lluvia, la duración, el total de mm precipitados, sus intensidades máximas (de 15, 30, 60, 120, 240 y 360 minutos de duración) y, cuando la lluvia excede los 10 mm, su energía erosiva.

### **Distritos de riego de la República Dominicana**

### **INDRHI. 1995**

Consiste en una presentación ordenada de las características de los distritos de riego del país.

Fundamentalmente está constituido por tres partes principales:

- la primera presenta la estructura organizativa del Departamento de distritos de riego, con una descripción de las funciones y los cargos;
- la segunda recoge aspectos relevantes relacionados con ubicación geográfica, clima, suelo, uso agrícola e hidrología de los distritos de riego. Recoge también información vinculada con la infraestructura hidráulica para riego y drenaje, la superficie dominada y los cultivos principales;
- La tercera trata de la organización y participación de los usuarios en la administración de los sistemas de riego.

### **Situación hídrica de los sistemas cerrados en la República Dominicana**

INDRHI, 1992

El objetivo de este trabajo fue estudiar las condiciones químicas de las aguas de los sistemas cerrados y su evolución en el tiempo para poder determinar los efectos de la acción antrópica.

Además se enfatizó en determinar la situación hídrica del Lago Enriquillo para la cual fue necesario conocer la morfología a través de un levantamiento hidrográfico.

Estos trabajos se planificaron sobre un mapa topográfico general en escala 1:50,000, en dicho mapa se determinaron los puntos de la red batimétrica y las distancias de cada sección de medidas.

El nivel del agua se determinó mediante una nivelación ordinaria y resultó ser de menos 43.29 m (3 de Junio de 1992).

La morfología del fondo del lago resultó regular con la profundidad máxima de 22.53m, localizada en la parte Norte a una cota de -65.83 m.

### **Proyecto de Código de Agua para la República Dominicana**

INDRHI - GTZ, 1990

Es un documento que está en proceso de aprobación en las Cámaras Legislativas, para fines de implementación en el territorio nacional.

Dicho documento se presenta en 13 capítulos con 358 artículos y en los cuales se indican todos los requerimientos legales para el uso de las aguas.

Los primeros cinco capítulos tratan del dominio de los recursos hídricos, del uso de las aguas públicas, de los derechos de uso y de los usos especiales de las aguas.

En los capítulos siguientes se trata de las aguas subterráneas, de obras hidráulicas, de la preservación de los recursos hídricos, de las penalidades, de los usuarios, de la autoridad de aplicación, del reconocimiento al uso establecido de las aguas y de las disposiciones finales y transitorias.

### **Información sobre el Inventario de las Estaciones Hidrológicas y Meteorológicas a Nivel Nacional**

INDRHI - GTZ, 1988

Es un informe que consta de tres partes, en el cual están definidas todas las estaciones de aforos y, pluviométricas, con sus respectivas fotos.

Por cada una de las estaciones se presenta su situación con todos los datos necesarios y útiles para los diferentes usuarios.

### **Plan Nacional de Ordenamiento de los Recursos Hidráulicos (DIAGNÓSTICO)**

OEA/INDRHI, 1994

Es un diagnóstico sobre la información hidroclicmática disponible, realizado con los fines siguientes:

- definir los períodos de información posible;
- homogeneizar y establecer la confiabilidad de los datos;
- realizar los análisis necesarios para sentar las bases de selección de las series de datos utilizables en el ordenamiento de los recursos hidráulicos.

El informe se presenta en tres partes fundamentales:

- un diagnóstico de la situación existente en el año 1976;
- un informe hidrológico preliminar donde se ponen de manifiesto las características geográficas, climatológicas y la hidrología del país;
- la actualización y presupuesto de costos para proyectos de infraestructura de riego.

### **Inventario Nacional de los Recursos Hidráulicos Superficiales**

INDRHI, 1990

Este trabajo tiene como objetivo principal la determinación de los volúmenes de los recursos hídricos superficiales y el potencial hidroeléctrico bruto de los ríos que conforman la red de drenaje de las cuencas hidrográficas del país que constituye un instrumento de planificación orientado a garantizar un control del uso de los recursos hídricos.

### **Fotografías Aéreas de la República Dominicana**

Proyecto Marena N° 517-T-035 (USAID), 1983 - 1984

En el curso del proyecto se ejecutó, por zonas, la cobertura de todo el país con una serie de fotografías aéreas (escala 1:40,000) debidamente ordenadas y que está disponible en el banco de datos hidrogeológicos del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.

Las zonas N° 3, 4 y 5 del proyecto MARENA cubren el área de EHN.

#### **Información a nivel del Valle de San Juan**

### **Investigación Ambiental con Isótopos de la Región Sudoeste y el Río Sonador, Yásica**

INDRHI/OIEA, 1985

Consiste en una investigación mediante el uso de técnicas isotópicas, y está presentado en tres volúmenes en forma de informes de avance.

Los objetivos principales de la investigación fueron los siguientes:

- determinar las zonas de recarga y de efluencia del agua subterránea en las áreas kársticas de la región Sudoeste (Sierra de Bahoruco, Sierra de Neyba, Valle de Neiba, Península de Barahona) y el balance hídrico de la región;
- determinar la estabilidad del caudal en el río Sonador, Yásica, con fines de aprovechamiento hidroeléctrico.

### **The Study on Groundwater Development Project in the Western Región, Dominican Republic**

INAPA / JICA, 1992

Es un trabajo de la Agencia Internacional de Cooperación del Japón en colaboración con el INAPA, el cual consistió en:

- evaluar el potencial de las aguas subterráneas y de los recursos alternativos en las cuatro provincias de Oeste: Monte Cristi, Dajabón, Elías, Piña e Independencia;
- preparar un programa de desarrollo de recursos hídricos con un plan de abastecimiento rural de agua;
- promover el intercambio y transferencia de tecnología con la contraparte de INAPA

durante el curso del estudio.

### **Mapa Geológico de la República Dominicana (Hoja San Juan)**

Secretaría de Estado De Industria Y Comercio/Dirección General de Minería, 1988.

Es un informe del Mapa Geológico de la hoja 5972 San Juan en la escala: 1:100,000, en el cual fueron compiladas las rocas del Cretáceo y del Terciario, de acuerdo a secuencias litológicas mapeables de constitución parecida al término Formación.

Los sedimentos sueltos del Cuaternario, se designan en este trabajo con términos genéticos exclusivamente.

Del análisis de este trabajo se deduce que el Valle de San Juan es un graben, integrado por rocas sedimentarias tales como arenisca, calcarenisca, lutita, marga, separada de la sierra de Neiba por fallas cuyo desnivel con las capas que se encuentran en el centro del graben es de aproximadamente de 2000 m; al Noroeste del Valle se encuentran basaltos Cuaternarios.

Entre otros aspectos vale la pena mencionar el análisis geoquímico de muestras tanto de rocas como de sedimentos de corriente el cual evidencia la posibilidad de mineralizaciones importantes.

Junto al mapa geológico se presentaron también:

- mapa tectónico;
- mapa de características geotécnicas;
- mapa de perfiles de sondeos someros.

### **Estudios de Factibilidad y Diseños Finales de la Zona de Influencia de la Presa de Sabana Yegua (Anexo 1 y 2)**

INDRHI / SNC Inc. Montreal, Canadá 1980

Es un estudio de factibilidad cuyo objetivo principal consistió en una revisión a la disponibilidad de agua a diferentes niveles de desarrollo, tomando en consideración los requerimientos de agua para usos productivos y déficits permisibles de agua para así poder evaluar los niveles de productividad del terreno.

El estudio presenta la evaluación inicial de cinco opciones principales de manejo para planificar los proyectos adicionales del desarrollo hidráulico de la cuenca del río Yaque del Sur

La evaluación se basa en el análisis hidrológico de la cuenca de dicho río y su principal afluente el río San Juan incluyendo la simulación preliminar de los embalses existentes en el sistema.

Específicamente se tomaron en consideración tres nuevas regiones en desarrollo, el área de influencia de la presa de Sabaneta, el sistema del río Mijo y los proyectos de desarrollo de riego y energía hidroeléctrica propuestos mediante la derivación del agua al valle de Azua.

En el curso del estudio se hizo una simulación del sistema del embalse y se llegó a las conclusiones siguientes:

- la regulación del caudal del río Yaque del Sur durante los años de sequía será de solamente un 60% del caudal anual promedio de la estación de Villarpando; por tanto la regulación del caudal no es suficiente para el desarrollo de riego potencial dentro de la zona de influencia de la cuenca del Yaque del Sur;
- la simulación del embalse indicó que aumentando el almacenamiento útil de Sabana Yegua hasta 670 hm<sup>3</sup>, el área de riego de Azua puede ser aumentada en aproximadamente 10,000 ha;
- se podrían irrigar aproximadamente 10,700 ha (7700 ha con aguas superficiales y 3000 ha con aguas subterráneas) con el almacenamiento útil del embalse, mientras que con un aumento en el almacenamiento hasta 670 hm<sup>3</sup> en el embalse proveer

unas 21,000 ha de desarrollo. Esto es para eficiencias en riego con agua de superficie de un 45% y un 60% con agua subterránea.

### 6.1.2 Inventario de puntos de agua

Las actividades de inventario se desarrollaron en forma esquemática en dos fases:

- Una primera fase (el inventario en su sentido más común), como primera actividad de campo del proyecto, antes de hacer los monitoreos piezométrico y de calidad de aguas.
- Una segunda fase, progresiva en el tiempo, en la cual se continuó añadiendo puntos de agua en el banco de datos cada vez que fuese necesario u oportuno.

#### Criterios utilizados en el inventario preliminar

El objetivo básico del inventario preliminar fue individualizar en el campo todos los puntos que tenían características tales que permitían poderlos utilizar en el tiempo como puntos de observación de la piezometría y/o de la calidad del agua, (incluyendo en estos últimos también aquéllos a utilizar para el control de la intrusión marina en las zonas costeras). Todo esto con el fin de conocimiento y estudio de los diferentes fenómenos, y de integrar y ampliar las redes de control existentes en las áreas de estudio.

Con este objetivo, el trabajo fue planificado y ejecutado de la manera siguiente:

- Trabajos preliminares:

- a) Consulta y recopilación de los datos existentes en bibliografía y en el banco de datos de INDRHI y de otros organismos.
- b) Identificación de los puntos de agua de las redes de control existentes.
- c) Redacción preliminar de fichas utilizando los datos disponibles.
- d) Ubicación en los mapas en escala 1:50.000 de estos puntos “bibliográficos”.

- Actividades de inventario en el campo, ejecutadas separadamente para cada zona:

- a) Verificación de los puntos de las redes de control monitoreadas por INDRHI.
- b) Verificación de los puntos “bibliográficos” y pesquisa de otros puntos existentes.
- c) Toma de informaciones generales sobre los puntos inventariados.
- d) Corrección de las fichas de los puntos “bibliográficos” en relación con la realidad encontrada en el terreno.
- e) Redacción de las fichas preliminares para los nuevos puntos.
- f) Ubicación en los mapas de todos los puntos inventariados.
- g) Ejecución, cuando fue posible, de las medidas de nivel piezométrico, de pH, de temperatura y de conductividad eléctrica

Conjuntamente a las actividades preliminares y a las de campo, se realizaron contactos estrechos con la oficina principal de INDRHI (Departamento de Hidrología) y con las unidades regionales de INDRHI de Azua (responsable del Valle de San Juan).

El responsable de Hidrología y un componente de la brigada de monitoreo de la Oficina Regional Sur (Azua) del INDRHI, se integraron a las actividades en el inicio del inventario, para facilitar el trabajo preliminar y la tarea de las brigadas de terreno, sobre todo por lo que atañe a la verificación de los puntos de las redes existentes.

En los términos de referencia, los puntos previstos para el inventario en el Valle de San Juan no estaban especificados (se indicaba un total de 700 puntos para las tres zonas de Azua, San Juan y Neiba).

En relación con la densidad de puntos prevista en la zona, con la realidad de terreno encontrada y con la diferente complejidad que los datos preliminares y los estudios existentes indicaban, se intentó cubrir el área de estudio con el número máximo de puntos con una distribución lo más uniforme posible y adecuada a las condiciones hidrogeológicas locales, a fin de poder permitir la constitución de una red de control lo más eficiente y representativa posible.

Los datos de los puntos inventariados se insertaron en el banco de datos del proyecto junto a un croquis de la situación y a dos fotos, una panorámica y una de detalle, según lo prescrito en los términos de referencia.

### **Tipología de los puntos añadidos durante las diferentes fases del proyecto**

Durante el desarrollo del proyecto se continuó con la inserción de nuevos puntos de agua y con la adquisición de los datos relativos, según las necesidades de campo y las evidenciadas durante el desarrollo de las diferentes actividades del proyecto.

Los tipos de puntos que se añadieron fueron:

- Nuevos pozos/sondeos/manantiales en substitución de puntos de agua de control piezométrico y/o de calidad de aguas no utilizados.
- Los sondeos perforados en el proyecto.
- Los sondeos no incluidos en el inventario preliminar donde se ejecutaron ensayos de bombeo.
- Los pozos no incluidos en el inventario preliminar donde se instalaron contadores volumétricos.
- Los sondeos/pozos no incluidos en el inventario preliminar, utilizados para ejecutar perfiles de salinidad para el control de la intrusión marina.
- Los sondeos/pozos no incluidos en el inventario preliminar donde se hicieron muestreos para la potabilidad.
- Los manantiales no incluidos en el inventario preliminar donde se hicieron muestreos para las aguas minero-medicinales.
- Los sondeos/pozos no incluidos en el inventario preliminar donde se hicieron muestreos para los análisis isotópicos.

Al igual que para los puntos inventariados en la primera fase, también en lo que se refiere a estos puntos, todos los datos recogidos se insertaron en el banco de datos del proyecto con las mismas modalidades.

### **Resultados globales obtenidos en el inventario preliminar al monitoreo**

El número total de puntos inicialmente inventariados en esta zona era de 256.

Por lo que atañe a la posible utilización de los puntos para la constitución de las redes de control resultó que:

- el 18% de los puntos (31), eran aptos sólo para medidas piezométricas;
- el 37% de los puntos (94), eran aptos sólo para medidas de calidad de aguas;
- el 7% de los puntos (17), eran aptos para medidas piezométricas y de calidad de aguas al mismo tiempo.

Esto significa que:

- el 25% solamente de los puntos inventariados (48), eran aptos para la red de control piezométrico;



- el 44% de los puntos inventariados (111), eran aptos para la red de control de calidad de aguas;
- el 39% de los puntos (99), no eran aptos, en las condiciones en las cuales los encontramos, para ser incluidos en las redes de control.

El elevado número de puntos inventariados se explica por la dificultad de encontrar puntos de agua para la red piezométrica.

Además, la repartición de los puntos en el espacio es muy irregular. Los pozos son muy raros sobre todo en toda la zona Sudeste: al contrario, cerca de la carretera principal de San Juan hay una concentración muy elevada de puntos de agua.

El uso por parte de la población de los puntos de agua es el más representado (sobre todo con bombas manuales). Aparecen también algunos pozos de gran diámetro hechos a mano abandonados o no muy utilizados.

Un papel importante en esta zona para la piezometría está desempeñado por los piezómetros del proyecto PRODAS.

### **Problemas encontrados**

Los problemas que más afectaron a la ejecución del trabajo y que ocasionaron después dificultades en la elección de las redes de control, fueron:

- en las zonas donde hay bombas manuales, los pozos no tienen orificio para las medidas piezométricas;
- la imposibilidad que se presentó en muchos lugares de tomar muestras con el toma-muestra, por el hecho de que casi todos los pozos tienen bombas manuales dañadas;
- los molinos de viento, si no hay viento, no permiten tomar muestras directas de los pozos y además la casi totalidad estaban dañados.

### **Cantidades finales y características principales de los puntos inventariados después de la inclusión progresiva de nuevos puntos**

A la fecha los puntos totales incluidos en el inventario (y pues en la base de datos) son de 308.

En la tabla 6.1.2/1, se ilustran los detalles relativos a las características de los puntos de agua considerados. Entre otros, podemos indicar lo que sigue:

- La casi totalidad de los puntos de aguas existentes están representados por pozos (el 91.9%). No hay manantiales inventariados.
- Entre los propietarios de los pozos, los más representados son: Salud Pública (29.2%), las comunidades (15.6%), INAPA (11.5%) y los particulares (9.7%). Los pozos de INDRHI, incluyendo los realizados en el proyecto, representan el 5.2% de los inventariados. En 60 pozos (19.5%) no se pudo identificar al propietario.
- En los pozos que tienen equipos de bombeo, los tipos de bombas más representados son las manuales (77.6%) y los molinos de viento (13.0%).
- Los pozos se utilizan principalmente para uso doméstico (64.3%).
- Las cotas de los pozos varían entre 198 y 820 m. s.n.m.
- Solamente en el 12% de los pozos se tienen datos (aunque estimados) de explotación anual.
- Los niveles estáticos medios (profundidad del agua desde la superficie) se sitúan alrededor de los 11.25 metros.
- El pH de las aguas se sitúa entre 6.5 y 8.6, con un promedio de 7.5.
- La temperatura de las aguas varía entre los 25.7 y los 30.0 grados Celsius con un promedio de 27.9 grados.
- Con referencia al número total de medidas ejecutadas, la conductividad eléctrica

---

supera los 500 microSiemens/cm en el 88.1% de los casos, los 1000 microSiemens/cm en el 28.8% de los casos y los 3000 microSiemens/cm en el 5.1% de los casos.

## 6.2 Base de datos y Sistema de Información Geográfica (SIG)

### 6.2.1 Realización de una base de datos

Para la realización de la base de datos alfanumérica de manejo de los datos recopilados en el proyecto “ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO NACIONAL EN LA REPÚBLICA DOMINICANA” se utilizó el DBMS *MSAccess97*. *MSAccess97* es uno de los más conocidos entre los database relacional comercializados en estos últimos años en las plataformas de tipo *Windows95-NT*.

Después de haber analizado las especificaciones técnicas del proyecto y de haber considerado los instrumentos a utilizar, la primera actividad fue el proyecto de la base de datos. Puesto que el database es tipo relacional, como primera acción se individuaron los atributos (datos) involucrados en el proyecto. Sucesivamente, mediante un proceso de normalización, se crearon las *entidades*.

La normalización es la técnica usada para controlar que cada atributo resulte asociado a la correcta entidad. La mejor representación utilizable para representar todas las entidades se denomina “*III forma normal*”. Después de haber definido las entidades se pasó a la creación de un modelo lógico “*Entidades-Relaciones*” y a la individuación de toda una serie de funciones e interfases a desarrollar en el interior de la base de datos de manera tal que el sistema resultase dotado de todas las funcionalidades de proyecto.

En la fase de realización se crearon las tablas (entidades) y las relaciones entre las distintas tablas; se individuaron luego aquellas tablas que tienen una referencia geográfica. Para estas últimas se creó un geo-código para el vínculo con el componente cartográfico numérico del GIS.

Se pasó luego a la realización de las fichas de interfase y de adquisición de datos. El código utilizado para el desarrollo de la BD y para la realización de las interfases es “*Visual Access*”. En *Visual Access* se realizaron también las interfases:

- con el modelo de las aguas subterráneas (*GMS*);
- con los programas de graficación de los datos químicos (*Hydrochem*);
- con el programa que dibuja las estratigrafías (*LogPlot97*).

En un segundo tiempo se llevó a cabo la revisión de las fichas de adquisición de datos, por indicación del cliente, y se implementaron algunos report para el manejo de las redes de control.

En el menú principal de la base de datos se introdujo también un botón que llama el ambiente de desarrollo estándar de *MSAccess97*. Mediante este ambiente, el usuario puede implementar nuevas funcionalidades o bien crear report y/o query. Se aconseja de todos modos el acceso a esta funcionalidad sólo a personal que tenga buen conocimiento del database *MSAccess97*.

Es posible acceder a la base de datos desde las computadoras del centro de elaboración conectadas en red. Habiéndola implementado para ser utilizada por usuarios múltiples, es posible operar en ella contemporáneamente, desde más de un lugar de trabajo. Para abrir la DB es necesario llamar el programa *MSAccess97* desde el menú de activación y sucesivamente, después de haber activado *Access*, es necesario abrir el file

**“Sdomingo.mdb”.**

En el start-up de la base de datos está visualizada una ficha que sirve como *“Menú principal”*. Mediante este menú es posible acceder a todas las funcionalidades implementadas en la base de datos. Para una descripción pormenorizada de las funciones y para la utilización de la base de datos hágase referencia a *“ANEXOS MEMORIAS M1”* (Manual de uso del BD hidrológico e hidrogeológico).

Otra recomendación importante se refiere a los salvatajes de la entera base de datos en unidades de backup externas. Periódicamente deberá salvarse el file *“Sdomingo.mdb”* de manera tal que eventuales daños de la base de datos no causen pérdidas de datos (este salvataje puede ser útil también en el caso de que sea necesario poner remedio a un daño del disco fijo de la computadora).

Si la introducción y/o la actualización de los datos se verifica en base diaria es aconsejable prever los siguientes salvatajes:

- **“diario”**, cada día de la semana efectuar un salvataje en disco magnético externo (uno por cada día de la semana);
- **“semanal”**, cada fin de semana, por todas las semanas del mes, efectuar un salvataje en disco magnético externo (uno por cada semana del mes);
- **“mensual”**, cada fin de mes, por todos los meses del año, efectuar un salvataje en disco magnético externo (uno por cada mes del año).

Se aconseja este tipo de salvataje, de todas maneras, no sólo para la base de datos alfanumérica, sino también para todas las demás tipologías que deben actualizarse periódicamente. En el caso en que, por motivos de cierre anómalo de la computadora (por ejemplo, corte de energía eléctrica), se dañe el database, *MSAccess97* posee una función de restablecimiento de la base de datos. En muchos casos esta función puede recuperar plenamente el database, es necesario recuperar el último salvataje efectuado y recomenzar a partir del mismo.

### **6.2.2 Implementación de un sistema de información geográfica**

El sistema de información geográfica (GIS) del proyecto Santo Domingo ha sido desarrollado en ambiente ArcView en plataforma NT. Además del software aplicativo desarrollado a propósito para las exigencias del proyecto, el GIS dispone de las funciones estándar del ambiente ArcView.

Los archivos – llamados también coberturas cartográficas – de interés específico para el GIS son:

- Isoipsas: conjunto de las curvas de nivel digitalizadas;
- Mapas: conjunto de los subdirectorios relativos a los distintos tipos de cartografías temáticas a producir;
- Null. cuadro de unión a utilizar para aquellos tipos de cartografía que no lo requieren;
- Odb: archivo de las Views salvadas (porque son de interés para el usuario) en el formato ArcView;
- Themes: conjunto de las coberturas de fondo.

Las **funciones del programa** son aquéllas típicas de los GIS; se pueden resumir en

visualización, manejo de datos espaciales y análisis espaciales. A estas funciones básicas se les han añadido funcionalidades específicas que permiten efectuar:

- la producción de la cartografía del proyecto;
- la importación y la interrogación de datos presentes en la base de datos de S.Domingo;
- procedimientos varios de ayuda.

El GIS responde a las exigencias típicas de la producción de cartografía automatizando, en primer lugar, la producción de las cartografías temáticas previstas en las escalas 1:50000, 1:100000 y 1:250000. Al mismo tiempo, éste suministra al usuario todos los instrumentos para crear nuevos mapas, en las escalas mencionadas o en otras, usufructuando eventualmente los cuadros de unión existentes.

La producción de la cartografía del proyecto está ayudada por la presencia de botones específicos e interfases dedicados a la creación de mapas. Con procedimientos análogos, siempre con la ayuda de interfases amigables, se alimentan también eventuales views o tablas intermedias creadas durante la producción de cartografía en función:

- del cuadro de unión que se entiende utilizar;
- del área específica individuada en el interior del cuadro de unión;
- del layout particular dotado de leyenda, márgenes, marcos y demás detalles que se quieran introducir.

A través de las funcionalidades puestas a disposición por el GIS está prevista también la **creación automática de un nuevo tema**. Esta exigencia nace cada vez que, durante la ejecución de los trabajos, se desee utilizar un nuevo mapa para los objetivos del proyecto. Al lado de esta posibilidad está previsto también un procedimiento semi-automático donde el proceso de producción del mapa resulta ser menos inmediato para el usuario, el cual, en cambio, tiene un control mayor sobre la operación de plotaje.

Además de las posibilidades arriba mencionadas, el GIS permite también activar funciones relacionadas con **el agregado y la edición de nuevos símbolos** de leyenda a acoplar a la producción de las elaboraciones cartográficas. Con relación a esta posibilidad, el ambiente GIS dispone de un amplio surtido de posibilidades de acción que permiten importar nuevos símbolos, borrar algunos no utilizados, disponerlos a lo largo de arcos de polilíneas.

El agregado de nuevos símbolos prevé también la introducción de nuevos marcadores (símbolos puntuales) y de nuevos shades, a través de la integración, en el GIS, de las potencialidades ofrecidas por el instrumento CorelDraw particularmente apto para el dibujo y catalogación de nuevas formas gráficas.

Además de las funcionalidades expresadas anteriormente, que se refieren predominantemente a los aspectos de la cartografía y de la gráfica, el GIS dispone de funciones de integración y conexión con la **base de datos alfanumérica** de los puntos de agua, ampliamente utilizada en el curso del proyecto.

El usuario puede acceder a cada una de las tablas de la base de datos directamente desde el ambiente del GIS, accionando un botón específico de la interfase gráfica. La

---

conexión con la BD puede llevar a la generación de nuevas coberturas cartográficas, a agregar a las preexistentes, a partir de aquellas tablas del data base en las cuales resulten, entre otras, también las coordenadas cartográficas (longitud y latitud) que permiten georreferir, bajo la forma de primitiva puntual, los records generales de la tabla examinada.

## 6.3 Piezometría

### 6.3.1 Campañas piezométricas

#### **Cantidades y metodología de elaboración de los datos**

En los Términos de Referencia del contrato estaba previsto utilizar unos 60 puntos para el control piezométrico de esta área y ejecutar 24 campañas de medidas mensuales, reducidas a 17 después de la aprobación del Addendum n. 1.

En realidad se ejecutaron las 17 campañas mensuales desde Septiembre de 1997 hasta Octubre de 1998 y luego desde Junio hasta Agosto de 1999.

Vista la variabilidad y la inestabilidad previstas por el hecho de que la casi totalidad de los puntos existentes eran privados y no dedicados para el control piezométrico, se tomaron en cuenta para el monitoreo, todos los puntos donde se podían hacer medidas de nivel piezométrico para poder definir al final de los dos años todos los puntos potencialmente utilizables en una red de control que a la vez fueran aptos técnicamente y confiables en términos de continuidad de las medidas en el tiempo.

Como núcleo inicial se tomaron en cuenta los puntos incluidos en el banco de datos del INDRHI, que ya tenían un mínimo de datos en tiempo pasado.

Con la llegada del huracán George y de sus consecuencias negativas a finales de Septiembre de 1998, después de la campaña de mediciones de campo en el siguiente mes de Octubre, donde se constató la disminución considerable de los puntos de medida (pozos fuera de servicio, acceso imposible etc...), se decidió interrumpir las medidas mensuales por 7 meses hasta que se pudiera regresar a una situación de normalidad. Las medidas se realizaron de nuevo por tres meses al final del período inicialmente previsto para poder definir la lista “definitiva” de los puntos aptos para la red y el diseño “final” de la misma.

En total se tomaron en cuenta 95 puntos (864 medidas) de los cuales 79 (644 medidas) antes del huracán y 58 (168 medidas) en los últimos tres meses de medidas (la diferencia de medidas se debe a la campaña de octubre de 1998 y a otras ocasiones específicas donde se necesitaban datos piezométricos para otras actividades).

Los puntos que se pudieron medir siempre en los trece meses antes del huracán y en los últimos tres meses (junio-agosto de 1999) fueron 42 o sea el 44.2% del total considerado. En los últimos 3 meses se añadió 1 nuevo pozo de control más los 14 pozos nuevos perforados en esta área durante el proyecto.

En la tabla 6.3.1/1 se ilustran los detalles de la distribución de las medidas.

El número total de medidas ejecutadas en esta área (864 contra un número previsto de 1020) fue inferior de 56 a lo previsto (-15.3%). Este hecho se debe a la escasez de puntos aptos en el área.

El mapa de la piezometría observada se realizó a partir de los datos piezométricos medidos en la red del proyecto a lo largo de las 13 campañas anteriores al huracán George (9/97 - 9/98). Se evitó la utilización de cualquier método de regionalización semiautomático como el Kriging, considerando que en la mayoría de los casos la densidad de los datos no permitía alcanzar resultados satisfactorios y, más importante, porque estamos convencidos de que realmente se requiere una interpretación integrada y

manual de todos los datos disponibles (ej. papel de los ríos y de los canales, influencia de áreas de fuerte explotación).

El proceso de interpretación nos permitió localizar los datos anómalos, o sea los influenciados por bombeos o los relativos a niveles acuíferos menores, normalmente superficiales y no representativos. Estos datos fueron eliminados. Considerando que:

- las variaciones piezométricas observadas en el período son generalmente pequeñas (en general < 1m y mucho menos en la proximidad de los sectores costeros en acuíferos de alta transmisividad, como en el caso de la Planicie Costera Oriental),
- dichas variaciones generalmente se encuentran muy por debajo de los intervalos piezométricos utilizados entre dos isopiezas,
- decidimos utilizar datos medios.

En función de los gradientes observados, de la densidad de los datos disponibles y de la representatividad de estos a nivel regional, se distinguieron las isopiezas principales desde las supuestas. Además en los sectores de interés específico (normalmente a lo largo de la costa, caracterizados por importantes fenómenos de intrusión salina) y donde los datos lo permitían, se diseñaron también isopiezas de detalle.

Una revisión de las interpretaciones, con relación solamente a los datos de pozos cuyas cotas y ubicación han sido determinadas por medio de técnicas Gps diferencial, ha evidenciado la existencia de diferencias apreciables en la proximidad de las áreas costeras y en las zonas con bajo gradiente. Por lo tanto la interpretación inicial se revisó y se modificó utilizando solo estos últimos datos.

### **Metodología utilizada para el diseño de la red de control piezométrico**

El objetivo de una red de control piezométrico es suministrar datos útiles al conocimiento de los fenómenos en acto asegurando contemporáneamente continuidad en el tiempo y confiabilidad/posibilidad de realización práctica de las medidas.

Las características de los puntos de la red deben ser:

- Distribución en el espacio y densidad adecuadas, en relación con los fenómenos a describir/monitorear, con los gradientes y con las variaciones piezométricas.
- Confiabilidad de los datos obtenidos (pozos sin bomba y lejos de pozos en explotación: solamente cuando no hay alternativas se pueden incluir pozos que no tengan estas características).
- Confiabilidad por lo que atañe a la continuidad de toma de medidas en el tiempo.
- Facilidad de acceso.
- Optimización entre número de puntos técnicamente aptos y número de puntos que en realidad se puedan monitorear con los recursos humanos y materiales disponibles.

Tomando en cuenta todo esto, el procedimiento adoptado para definir la red de control en cada área de estudio ha sido el siguiente:

- a) Selección de todos los puntos donde se pueden realizar medidas piezométricas y realización de éstas durante el tiempo previsto en el proyecto, añadiendo cuando sea necesario u oportuno, otros puntos nuevos en substitución/integración de otros donde las medidas no se pueden realizar más.
- b) Reconstrucción de las isopiezas, donde sea posible (en relación con la existencia de puntos y la cantidad de medidas que se habían podido ejecutar en cada uno de ellos) según el procedimiento indicado más arriba en este mismo informe
- c) Estudio/interpretación de las mismas.
- d) Selección de los puntos donde se pudieron ejecutar medidas durante todos los



meses de campañas piezométricas (que incluyen los pertenecientes a la red histórica de INDRHI) y depuración de aquéllos cuyas medidas habían sido afectadas significativamente por bombeos.

- e) Selección de los puntos nuevos añadidos durante las diferentes campañas que se pudieron medir hasta (o por lo menos en) Agosto de 1999 y depuración de aquéllos cuyas medidas habían sido afectadas significativamente por bombeos.
- f) Selección de los pozos nuevos realizados en el proyecto después de Agosto de 1999 o que no se pudieron medir en los últimos tres meses por otras razones, pero que seguramente se podrán utilizar en futuro.
- g) Reunir y poner en un mapa de trabajo los pozos de los puntos d), e) y f) evidenciando los que tienen bombas (instaladas aunque no en funcionamiento) que llamaremos “puntos aptos” a ser utilizados en la red de control.
- h) Selección de aquéllos, entre los puntos aptos, que satisfacen los criterios indicados más arriba en este mismo párrafo y definición de la red de control.
- i) Redacción de la parte relacionada con la piezometría del Mapa 2 – “Mapa de la red piezométrica y de aforos directos”.

En dicho mapa están indicados con apropiada simbología los puntos de la red de control que incluye el número (optimizado) de puntos que hay que continuar midiendo en el tiempo y, con otra simbología, los puntos no incluidos, pero “aptos” para el control piezométrico. Entre estos últimos eventualmente se podrán escoger soluciones alternativas, si es posible, para substituir puntos de la red que se tengan que eliminar.

El procedimiento utilizado, entre otras cosas, ha tomado en cuenta el hecho de minimizar al máximo la inestabilidad de la red de control evidenciada en el curso de las campañas de medida (ver Memorias finales – Anexos Generales – Anexo G3), incluyendo de preferencia en la red los pozos no utilizados y/o dedicados a este fin.

### **6.3.2 Determinación de las coordenadas plano-altimétricas de puntos de agua**

La **campaña de mediciones mediante instrumental GPS** tenía por fin la determinación de las coordenadas plano-altimétricas de un cierto número de pozos, presentes en las 6 áreas de investigación, en los cuales se medía periódicamente el nivel de la piezometría. El sistema GPS, midiendo las distancias entre una antena receptora, ubicada en correspondencia del punto a medir, y un cierto número de satélites, y conociendo la posición de los mismos, efectúa una triangulación que permite obtener la posición del punto arriba citado.

Esta posición, empero, no es de utilización inmediata, por los siguientes motivos:

- 1) La medición está afectada por errores de distintos tipos, que hacen que a priori las indeterminaciones en las coordenadas del punto sean del orden de 100 m en planimetría y de 150 m en altimetría.
- 2) El sistema de referencia en el que la medición se efectúa es el propio del GPS, denominado WGS 84 (World Geodetic Datum de 1984). Por lo que atañe a la planimetría, las coordenadas obtenidas pueden distar varios centenares de metros de aquéllas de los sistemas locales presentes en los varios países. Por lo que atañe a la altimetría, la cota medida es la relativa al elipsoide de referencia, o sea al WGS 84, y no se trata pues de una cota sobre el nivel del mar, que, en cambio, es la que es habitualmente de interés.

Para solucionar el primer punto, fue necesario construir una red de medidas, utilizando un determinado número de receptores GPS (4, en nuestro caso), y manteniendo en todo

caso uno o más receptores en puntos fijos, de los que se conociesen las coordenadas. De tal manera, y utilizando software oportunos, es posible obtener a posterior una posición para los pozos caracterizada por una elevada precisión. Esto se verifica si están satisfechas las siguientes condiciones:

- Las coordenadas de los puntos conocidos deben ser conocidas con la máxima precisión posible en el mismo sistema de referencia en el que se efectúa la medición.
- La distancia entre los pozos y los puntos conocidos no debe superar un límite máximo, del orden de los 15-20 km.

En la República Dominicana no hay noticia de puntos de los que se conozcan las coordenadas en el sistema WGS 84. Existen sin embargo algunos puntos trigonométricos, instituidos por lo general en los años '50, que podían ser utilizados para nuestros fines; pero de ellos se conocen las coordenadas en el sistema local NAD 27 (North American Datum de 1927). Fue necesario, por lo tanto:

- Fijar arbitrariamente las coordenadas de un punto trigonométrico, convirtiendo sus coordenadas del sistema NAD 27 al WGS 84; en particular se eligió el punto de Haina, al Oeste de Santo Domingo, por su posición central en el ámbito de las 6 zonas de investigación.
- Construir una red GPS preliminar para determinar las coordenadas de otros puntos trigonométricos localizados en el territorio mediante una inspección preliminar. Se hace notar que el número de puntos utilizables resultó ser exiguo por distintos motivos, como por ejemplo la excesiva incomodidad o la imposibilidad de localización, o la imposibilidad de colocación de un aparato GPS en los mismos.

En este área fue utilizado un solo punto trigonométrico: Cabral.

La utilización de un solo punto no permitió satisfacer la condición de distancia máxima de los pozos de 15-20 km. Fue necesario, pues, instituir un cierto número de nuevos puntos de referencia, seleccionados siempre durante la fase preliminar de inspección, de modo tal que se encontraran en correspondencia de la mayor parte de los pozos. En particular, para el Valle de San Juan, fueron seleccionados 2 nuevos puntos.

Por lo que atañe a la solución del punto 2) del que se ha tratado arriba, es necesario distinguir entre la conversión de las coordenadas planimétricas del sistema WGS 84 al NAD 27 y la conversión de la coordenada altimétrica de cota elipsoidal en el sistema WGS 84 a cota sobre el nivel del mar, o cota ortométrica. Utilizando los puntos trigonométricos arriba citados, de los cuales se conocían las coordenadas planimétricas en ambos sistemas de referencia, se calcularon, mediante oportunos algoritmos, los parámetros de la transformación que permitiesen pasar de un sistema al otro con la mínima indeterminación posible.

Viceversa, para la transformación de las cotas era necesaria la presencia de un "geoide", o sea de un modelo matemático que describiese la desviación entre las cotas elipsoidales y las ortométricas en correspondencia de las áreas examinadas. Tal modelo, para el área del Caribe, fue calculado en los Estados Unidos por el NGS (National Geodetic Survey) y por la NIMA (National Imagery and Mapping Agency) y fue denominado CARIB 97, y se puede disponer de él gratuitamente. Tratándose de modelo matemático, éste debía ser "calibrado" localmente, para hacer corresponder las cotas obtenidas con verdaderas cotas sobre el nivel del mar.

En la República Dominicana están presentes algunas líneas de nivelación, es decir líneas a lo largo de las cuales se pueden hallar puntos de los que se conoce con precisión la cota ortométrica. Estas líneas pertenecen por lo general a dos grupos, el primero instituido en los años '50, el segundo en los años '70. Desdichadamente no fue posible determinar cuál era el punto de referencia utilizado para definir la cota "0", o sea el nivel del mar propiamente dicho, ni si esta referencia era la misma para ambos grupos de líneas de nivelación.

Estas líneas, además, suelen estar instituidas a lo largo de las líneas de comunicación. A distancia de 20, o 40 años, obviamente casi todas las carreteras sufrieron fases de mantenimiento, que en la mayoría de los casos llevaron a la destrucción de los puntos de nivelación. Esto hizo que aun disponiendo de aproximadamente 180 monografías, fuese posible localizar sólo 29 puntos, comprendiendo en tal número también aquéllos de los que se halló sólo el punto preciso en el que se encontraba, aun resultando removida o destruida la materialización.

Por último, de tales puntos no se conocía obviamente la coordenada en el sistema WGS 84, y ni siquiera aquélla en el NAD 27, dado que la monografía presenta sólo la distancia progresiva desde el comienzo de la línea. Fue necesario, por lo tanto, estacionar en ellos con un instrumento GPS a fin de determinar sus coordenadas. Esta actividad se llevó a cabo en la fase preliminar en la cual se definieron los puntos de referencia.

La campaña de medición propiamente dicha requirió aproximadamente 3 meses de trabajo por parte de 4 cuadrillas. Cada punto fue estacionado por un intervalo de tiempo comprendido entre 30 y 60 minutos, según su distancia desde el punto de referencia. El total de pozos medidos fue 517, de los cuales 50 para el Valle de San Juan.

Muchos de éstos no se podían medir directamente mediante el instrumental GPS. La antena utilizada, para poder recibir las señales de los satélites en órbita, necesita una visual del cielo lo más posible libre, y esto no era posible a menudo por la presencia de cobertizos, muros, o vegetación. En este caso se seleccionaba un punto que permitiese la medición lo más cerca posible del pozo, del cual se medían la coordenadas mediante GPS. Contemporáneamente se medía la distancia y la dirección de la línea que unía ambos puntos, de manera que se pudiese sucesivamente obtener las coordenadas del pozo a partir de las del punto medido.

### **6.3.3 Levantamiento taquimétrico de puntos de agua**

El levantamiento taquimétrico para la determinación de la cota de puntos de agua, se aplicó en un caso específico, donde era importante una determinación precisa de la elevación de cada punto.

Esta metodología de determinación de la cota se aplicó en sondeos cerca del Río Cano, para comprobar las relaciones entre estos últimos y el acuífero aluvional.

El levantamiento de las cotas se realizó en una campaña llevada a cabo en Noviembre de 1999. Se utilizó una brigada de 4 personas formada por:

- . 1 agrimensor
- . 1 ingeniero hidrogeólogo
- . 1 ayudante
- . 1 chofer - ayudante

Las medidas se realizaron aplicando el método de la nivelación geométrica (nivelación compuesta a doble estadía), utilizando un nivel de precisión marca Wild NK2 con nivel basculante y dos estadías tipo libro de 4 metros.

Se determinaron las cotas de los siguientes 3 puntos:

<i>Identificación del sondeo / punto</i>	<i>Código del punto en el Banco de datos</i>
Río Cano 1	4886
Río Cano 2	4887
Nivel del agua en el Río Cano en el punto más próximo al sondeo Río Cano 2.	

Los resultados se introdujeron en el banco de datos y se tomaron en cuenta para las actividades de conceptualización hidrogeológica y para la modelización.

## 6.4 Hidroquímica e intrusión marina

La primera actividad llevada a cabo, inmediatamente después del inventario de los puntos de agua, consistió en la definición de los puntos de control de calidad y de la intrusión marina.

### 6.4.1 Muestreo y análisis para la calidad de las aguas

Vista la cantidad de puntos inventariados, la selección de los pozos a destinar a la red de control de calidad presentó (a parte algunos problemas relacionados con la distribución en el espacio de los puntos aptos existentes, no siempre optimal) sólo la dificultad de elegir los mejores.

Los requisitos necesarios para incluir un punto en la red requirieron una selección muy rigurosa.

Por lo que concierne a la red de control de la calidad, los requisitos indispensables para la inclusión de un pozo en la red de control son:

- características de realización del pozo adecuadas;
- accesibilidad;
- distancia relativa de los demás puntos de la red;
- distribución en el espacio en relación también con los acuíferos presentes;
- frecuencia de utilización;
- disponibilidad de un equipo de bombeo;
- posibilidad de toma de las muestras en las cercanías de la boca de pozo.

En el curso del año de observación en algunos casos faltó la disponibilidad del punto seleccionado, tanto por revocación de parte del propietario de la concesión de acceso, como por la imprevista imposibilidad de utilización del punto. En los límites de lo posible, se trató de sustituir los pozos que no era posible utilizar con otros con características similares ubicados en las inmediatas cercanías.

En esta área la red de control resulta estar constituida por 35 puntos, su distribución está presentada en el mapa: “Mapa de caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas” (Mapa 4).

### Muestreo

La organización logística de la actividad de muestreo se valió de brigadas constituidas por dos personas equipadas de la siguiente manera:

- pHímetro y termómetro digital;
- Conductímetro de compensación de temperatura;
- kit de campo para la determinación de Bicarbonatos y Carbonatos;
- kit de campo para la determinación de Nitritos y Nitratos;
- equipo para la filtración del agua en filtros de 0,45  $\mu\text{m}$  de porosidad;
- botellas de polietileno para la conservación de la muestra;
- HNO<sub>3</sub> para la conservación de la alícuota de muestra para el análisis de los cationes;
- freatómetro;
- termómetro para el aire.

Cada muestra fue identificada con un número de cinco cifras; las primeras cuatro tomadas del inventario: la primera cifra identifica el área de procedencia, las sucesivas tres el número progresivo del punto de agua; por último la quinta cifra es indicativa de la campaña de muestreo (1, 2, 3, 4).

Los resultados de las mediciones se anotaban tanto en las fichas de control como en los cuadernos de campo (Anexo Memoria6).

Los procedimientos de muestreo, de calibración y control periódico del instrumental de campo fueron estandarizados según los procedimientos indicados por “Standard Methods” [APHA, AWWA, WEF, Standard Methods 18<sup>th</sup> Edition, American Public Health Association, 1992].

Las muestras recolectadas por cada cuadrilla se almacenaban temporáneamente en la base logística de la que dependía la brigada, para ser enviadas luego, con cadencia semanal, a la sede de Aquater en la ciudad de S. Domingo.

En la sede de Aquater de S. Domingo se controlaba la integridad física y el número de los recipientes, además se redactaba el registro de las muestras para la transmisión al laboratorio.

Contextualmente, los datos de campo se controlaban y se introducían en el banco de datos.

#### **Actividad de laboratorio**

La transmisión de las muestras al laboratorio INDRHI se oficializaba mediante la toma en cargo de las aguas y de la copia del registro de las muestras, firmada por el responsable de Aquater y contrafirmada por la responsable del laboratorio, una vez cumplidos los procedimientos de control de la integridad de los recipientes y de la correspondencia de la numeración.

Los análisis requeridos y efectuados por el laboratorio son los siguientes (Anexo memoria 6):

- conductividad eléctrica específica;
- pH;
- bicarbonato;
- carbonato;
- cloruros;
- sulfatos;
- sodio;
- potasio;
- calcio;
- magnesio;
- amoníaco (en la última campaña).

#### **Organización de los datos**

Los resultados de las actividades analíticas relativas a la calidad de las aguas se organizaron en el banco de datos dividiéndolos entre análisis de campo y análisis de

laboratorio.

Se pueden consultar los datos de campo utilizando los campos relativos a:

- n° de inventario del punto;
- n° de la campaña;
- datos de toma;
- datos relevados;
- tipología de análisis;
- descripción de la red de pertenencia.

Se pueden consultar los datos de laboratorio utilizando los campos relativos a:

n° de inventario del punto;  
n° de la campaña;  
fecha de muestreo;  
datos analíticos.

Sobre la base de la organización descrita aquí es posible extraer las informaciones necesarias de vez en vez según las exigencias específicas del momento y, si es necesario, crear los files a destinar a la elaboración gráfica mediante el código de cálculo Hydrochem de Rockware, Golden Colorado (USA).

#### **6.4.2 Muestreo y análisis isotópicas**

En el curso del proyecto se han tomado un total de seis muestras, en todas las muestras tomadas se han determinado: Oxígeno-18 (O18), Deuterio (D) y Tritio (T), en dos C13 y C14..

La toma, la conservación de las muestras y las técnicas analíticas han sido realizadas en conformidad con las normas indicadas por la Agencia Internacional para la Energía Atómica de las Naciones Unidas [A.I.E.A., 1983. Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology. -Technical. Reports Series n° 91, Vienna, 439p].

Los análisis han sido efectuados en la República Federal de Alemania en el laboratorio Hydroisotop de Schweitenkirchen (Anexo memoria 7).

#### **6.4.3 Muestreo y análisis para la potabilidad**

La investigación sobre la potabilidad de las aguas subterráneas en los sectores de estudio del proyecto está descrita con mayor detalle en el Anexo 8 (“Potabilidad de las aguas”), del cual el Mapa 6 (“Mapa de clasificación de la potabilidad de las aguas”) constituye la síntesis cartográfica de los resultados.

La evaluación de las características de potabilidad de las aguas subterráneas ha sido realizada específicamente a través de una campaña de toma y análisis de 40 aguas, 1 de las cuales dentro del área de San Juan, procedentes de pozos públicos, localizados en las áreas de estudio. Tales resultados fueron integrados con la reinterpretación, a fines de la utilización potable, de los datos relativos a las aguas de los 395 pozos pertenecientes a la Red de Calidad, de los cuales 35 ubicados dentro del área en

cuestión.

Mientras que las 40 muestras tomadas expresamente para esta investigación han sido sometidas a una pormenorizada determinación de los parámetros químico-físicos y microbiológicos que determinan la idoneidad de las aguas naturales para el consumo humano, para la evaluación de los demás puntos hídricos se ha considerado un número de parámetros reducido y limitado a aquellas especies químicas, ya determinadas en el curso de las cuatro campañas de calidad, capaces de suministrar, aunque sea parcialmente, una indicación restringida sobre la potabilidad de las aguas.

Los parámetros sometidos a investigación en los puntos hídricos muestrados para esta investigación han sido los siguientes:

Parámetros microbiológicos

- Coliformes (Colibacilos totales)
- Coliformes fecales (Colibacilos fecales)
- Enterococos (Streptococos fecales)
- Microorganismos (Microorganismos aerobios mesófilos)

Parámetros químico-físicos

- Conductividad
- pH
- Turbiedad
- Residuo Fijo
- Cl
- SO<sub>4</sub>
- NO<sub>3</sub>
- NO<sub>2</sub>
- Pb
- Ca
- Mg
- F
- P
- Fe total
- Cd
- Cr
- NH<sub>4</sub>

Para los puntos hídricos pertenecientes a la red de calidad, monitoreados en el curso del proyecto por 4 distintas campañas de medición y análisis, entre las especies determinadas en dicho ámbito, han sido sometidas a un control de congruidad con los límites normativos de referencia los siguientes:

- Conductividad
- pH
- Residuo Fijo
- Cl
- SO<sub>4</sub>
- NO<sub>3</sub>



- NO<sub>2</sub>
- Ca
- Mg
- NH<sub>4</sub>

El muestreo específico para la determinación de potabilidad ha sido realizado en conformidad con todo lo prescrito en:

- UNICHIM “Metodi di campionamento per acque interne superficiali e sotterranee”, Manuale n. 144/85
- UNI EN ISO/ 5667-3, Qualità dell’acqua. Campionamento. Guida per la conservazione ed il mantenimento di campioni, Dicembre 1995
- UNI 10674 Acque destinate al consumo umano. Guida generale per determinazioni microbiologiche, Febbraio 1998
- EPA 600/(4-79-020), Methods for Chemical Analysis of Water and Wasts Federal Register, Sept. 3. 1987. 40 CFR Charpet1, Revised July 1.1988
- EPA 823 - B - 9, Water Quality Standards Handbook: Second Edition Appendixes, 1994

Las modalidades de toma de las muestras de pozos equipados con bomba han estado sustancialmente ligas al estado de la misma, es decir:

- Bomba in erogación continua. La muestra ha sido tomada directamente;
- Bomba instalada pero detenida. L’erogación antes del muestreo se ha prolongado por un tiempo suficiente para el vaciamiento de las tuberías de enlace si la detención de la bomba había sido de breve duración, si al contrario, la detención de la bomba había sido superior a los tres días, el expurgo ha tenido una duración suficiente para la obtención de agua representativa del acuífero, eliminando, indicativamente, un volumen de agua equivalente a 3 veces el del pozo mismo.

Los análisis químico-físicos y bacteriológicos han requerido muestreos diferenciados tanto en las modalidades de toma como en la utilización de envases específicos.

Para las muestras de agua a enviar al laboratorio para los análisis químico-físicos las distintas alícuotas ha sido recogidas en envases de polietileno con tapón y contratapón herméticos. En el momento de la toma la muestra ha sido filtrada con una membrana con poros de 0.45  $\mu\text{m}$  y limitadamente a las tomas de análisis destinadas a la determinación de los metales, acidificada con HNO<sub>3</sub> hasta pH 2.

Para la recolección de las muestras para análisis bacteriológicos se han utilizado envases estériles con contratapón y tapón de rosca. Ningún tratamiento ha sido efectuado en campo, salvo recoger las muestras utilizando guantes de látex descartables. Las muestras tomadas de esta manera han sido inmediatamente colocadas en frigorífico portátil y mantenidas a 4°C hasta la entrega al laboratorio analítico, ocurrida dentro de las 24 horas sucesivas desde el momento de la recolección.

Con relación a los parámetros químico-físicos, para la evaluación de la calidad potable de las aguas subterráneas en las áreas de estudio ha sido utilizado como referencia normativa lo prescrito por la OMS, en la emanación de 1993, siendo esta última difusamente adoptada como referencia en numerosas naciones que no poseen una normativa propia.

La toma de posición de no vincular el juicio de potabilidad alla normativa nacional vigente (NORDOM 64) está justificado por la subsistencia de límites, tan restrictivos como inapropiados para algunos de los parámetros considerados, que habrían determinado un

juicio de no potabilidad para la casi totalidad de los puntos hídricos considerados.

Para los parámetros microbiológicos nos hemos referido en cambio sólo a la norma dominicana utilizando los límites fijados por las otras normativas solamente para fines comparativos.

El juicio expresado de esta manera sobre la potabilidad de las aguas expresamente tomadas para esta investigación, en el caso de comprometimiento sólo de los parámetros microbiológicos ha sido aplazado a un sucesivo muestreo y análisis de verificación, a realizarse previa cuidadosa esterilización preliminar de los pozos.

Las muestras de la red de calidad sometidas al juicio de permeabilidad reflejan, en cambio, en el caso de evaluación positiva, los límites obvios que derivan de un número incompleto de parámetros que no permite un juicio definitivo.

Estas muestras, analizadas en el curso de distintas campañas de toma y análisis, han sido evaluadas verificando la persistencia temporal de las condiciones de potabilidad de las aguas en los puntos hídricos considerados.

#### **6.4.4 Muestreo y análisis para aguas minerales y minero-medicinales**

La ausencia de manantiales aptos, no ha permitido extender el estudio a esta área.

#### **6.4.5 Control de la salinidad y de la intrusión marina**

Vista la colocación interna, para esta área no se planteaban problemas ligados a la intrusión marina y por lo tanto no se ha llevado a cabo ninguna actividad específica en este sentido.

## 6.5 Geofísica

### 6.5.1 Objetivos de las campañas geofísicas

El objetivo indicado en los Términos de Referencia era determinar los espesores de las formaciones acuíferas o de toda forma de interés hidrogeológico.

En la realidad, a parte de algunas excepciones representadas esencialmente por formaciones aluviales, los espesores de las formaciones de interés hidrogeológico presentes en el área de estudio son demasiado grandes para poder ser determinados con el tipo de prospección previsto. Se eligieron entonces objetivos de diferente naturaleza pero siempre de gran utilidad para los fines del estudio.

En esta zona, donde no se tenían datos, ni piezométricos ni estratigráficos, se utilizó la geofísica de forma muy fuerte para poder obtener informaciones sobre las características de permeabilidad de las diferentes formaciones presentes (aluviones y molasas sobre todo) y sobre la continuidad o no, a nivel regional, de horizontes arenoso-conglomeráticos presentes en las formaciones terrígenas continentales de edad plio-pleistocénica.

### 6.5.2 Cantidades previstas y ejecutadas

En el anexo E del contrato no estaba prevista una subdivisión por área de los sondeos previstos (para los detalles sobre cantidades totales previstas y cambios efectuados en relación con el cambio de objetivos, véase el Anexo 10).

Las cantidades ejecutadas en el Valle de San Juan fueron las siguientes:

S.E.V. con AB = 150 m	2
S.E.V. con AB = 500 m	34
S.E.V. con AB = 1000 m	136
<b>Total S.E.V. realizados</b>	<b>172</b>

El trabajo se ejecutó en dos campañas (ver párrafo siguiente).

### 6.5.3 Metodologías de prospección y de interpretación utilizadas

#### Organización general de la prospección

La prospección geofísica fue realizada en dos campañas con el fin de poder determinar, con un período intermedio dedicado a la interpretación, si los objetivos iniciales podían ser alcanzados y para entonces permitir, ya sea intensificar las medidas donde fuera necesario, ya sea cambiar estrategia en caso de no definición del blanco requerido.

En la primera campaña realizada en Septiembre de 1998, se ejecutaron los primeros perfiles de S.E.V. en toda el área.

La segunda fase se realizó en el mes de Diciembre de 1998 – Enero de 1999. En la segunda parte del trabajo se continuó/integró la prospección de la primera fase.

#### Metodología de prospección adoptada

Los métodos geofísicos de investigación tienen por objeto obtener información sobre las características de las formaciones geológicas del subsuelo por medio de la determinación de parámetros físicos obtenidos a través de observaciones y mediciones realizadas en la

superficie del terreno (métodos indirectos de prospección).

En el presente estudio el método empleado fue el geoelectrico (de resistividad).

Los métodos de prospección geoelectrica se dividen en dos categorías:

- Los que utilizan una “señal natural” (campos eléctricos inducidos por diferentes factores naturales).
- Los que utilizan una “señal artificial” (se induce en el subsuelo un campo eléctrico con el envío de una corriente eléctrica por medio de una fuente de energización externa como baterías, generador...).

En este estudio se utilizó uno de los métodos del segundo tipo en su modalidad Sondeos Eléctricos Verticales, mediante el cual se pueden determinar las resistividades y los espesores de los diferentes estratos del subsuelo.

### **Principios y descripción del método utilizado**

La metodología de prospección geoelectrica adoptada estudia las modificaciones, dentro del subsuelo, del campo eléctrico inducido con una fuente de corriente continua, ocasionadas por las diferentes resistividades de las formaciones geológicas presentes y por la geometría de estas últimas.

La resistividad  $\rho$  de un cuerpo conductor eléctrico es definida como 
$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

donde con  $\sigma$  se indica la conductividad eléctrica, o sea la aptitud o capacidad del cuerpo de conducir la corriente eléctrica.

Los factores que determinan la resistividad de las diferentes capas en el subsuelo son esencialmente:

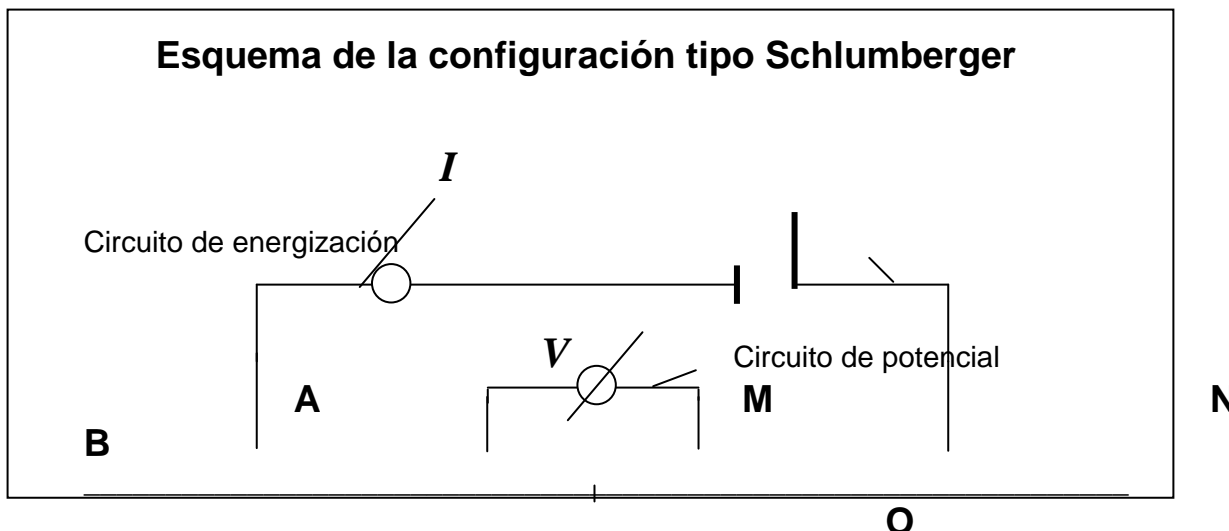
- La litología de las formaciones presentes.
- La presencia de agua (u otro fluido de imbibición).
- El contenido salino y la temperatura del agua.
- Los espesores y, de forma general, la geometría de las diferentes capas eléctricas en el subsuelo.

Estos factores hacen de este método una disciplina muy utilizada en el campo de la hidrogeología y de los problemas de intrusión marina.

Un aspecto muy importante a considerar es también el hecho que, en la prospección y en la interpretación de los datos, hay una experiencia consolidada por más de 30 años de actividad con muchos “case history” de referencia.

Obviamente, como cualquier tipo de prospección indirecta, es decir que no mide directamente el objeto de la investigación (mide solamente desde la superficie parámetros relacionados con el objeto mismo), necesita una buena calibración para dar resultados confiables y representativos de la situación real (este aspecto es aún más importante si se consideran los problemas de “equivalencia”, es decir que diferentes situaciones del subsuelo pueden ocasionar la misma respuesta desde el punto de vista de los parámetros medidos).

Existen diferentes configuraciones electrónicas para la prospección geoelectrica. La más utilizada (adoptada también en el presente estudio) para la ejecución de los S.E.V. es la configuración cuadrielectrónica (arreglo) de tipo Schlumberger, representada esquemáticamente en la siguiente figura



En los trabajos de campo, los parámetros que se miden son la intensidad de corriente  $I$  (poniendo un miliamperímetro en serie con el circuito de energización), la diferencia de potencial  $V$  (mediante un milivoltímetro puesto en paralelo al circuito de potencial) y las distancias entre los electrodos A, M, N, B utilizados.

El sondeo eléctrico vertical (S.E.V.) consiste en efectuar una serie de medidas dejando siempre el centro del dispositivo en un mismo punto "O" y aumentando sucesivamente la distancia AB, con el propósito de explorar siempre más en profundidad, hasta la profundidad deseada. Los electrodos A y B se llaman "electrodos de corriente" y los M y N "electrodos de potencial".

Por cada posición sucesiva de A y B se puede así calcular la resistividad  $\rho$  con la fórmula siguiente:

$$\rho = K \frac{V}{I}$$

donde K representa la constante característica del arreglo, conocida como factor geométrico por ser función de la separación de los electrodos A, B, M y N y que se calcula, por cada posición ABMN, de la forma siguiente:

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}$$

Desde el punto de vista teórico, si el subsuelo fuera un medio homogéneo e isótropo, la resistividad  $\rho$  que se calcula de la forma arriba indicada, representaría la resistividad real del mismo medio.

En circunstancias reales, estamos muy lejos de esta condición. Entonces el parámetro que se mide tiene las dimensiones físicas de una resistividad, pero no representa la resistividad de ningún medio conductor. Este parámetro es función:

- de las resistividades reales de las capas que se encuentran en el volumen de terreno donde está presente el campo eléctrico inducido durante la energización,
- de la geometría (espesores, estructura geológica),
- de las deshomogeneidades de las mismas capas.

Este parámetro se llama “resistividad aparente” y se indica con  $r_a$ .

Poniendo en un gráfico en las abscisas los valores de la semidistancia entre los electrodos AB ( $AB/2$ ) y en las ordenadas la resistividad aparente ( $r_a$ ) por cada posición sucesiva de los electrodos de corriente, se construye una curva que representa la función  $r_a = f(AB/2)$  que se utiliza para la interpretación de los datos (ver párrafo 6.5.5 más abajo).

#### 6.5.4 Equipos utilizados

El estudio geofísico fue conducido por dos brigadas cada una de ellas constituida por un geólogo-geofísico y dos ayudantes.

Los sondeos eléctricos fueron ejecutados con dos equipos diferentes: el primer equipo fue un PKE analógico fabricado en Polonia con escala de 1 a 3000 mV o mA; el segundo equipo fue un PASI digital fabricado en Italia con escala hasta 10000 mV y 3000 mA.

Fueron utilizados cables unipolares en acero y cobre para el circuito AB y cables con elevado aislamiento para el circuito MN.

En cada sondeo fueron utilizadas 4 barras de acero por cada electrodo de corriente (A, B) para disminuir los efectos de las resistencias de contacto y barras de cobre para los electrodos de potencial (M, N).

La fuente de energización utilizada estaba constituida por baterías con una diferencia de potencial nominal máxima de 450 V por cada equipo.

Todo el equipo utilizado fue periódicamente controlado.

#### 6.5.5 Interpretación de los resultados

Por lo que se refiere a los principios generales de la interpretación, se puede indicar lo que sigue:

Los métodos de interpretación existentes, permiten calcular con determinadas ecuaciones las curvas teóricas  $r_a = f(AB/2)$  para diferentes modelos del subsuelo, cada uno constituido por diferentes capas de espesor definido y resistividad real  $r$ . Para

simplificar la resolución de las ecuaciones, se ha asumido que el espesor de la última capa sea infinito (en la práctica de dimensiones mucho más grandes que las de las otras capas superiores).

Cambiando los parámetros del modelo (número de capas, sus espesores y sus resistividades), se calculan las curvas teóricas correspondientes y se busca la que se superpone de mejor forma a la curva de campo (procedimiento de búsqueda del “best fit”). Una vez encontrado un “fit” satisfactorio, se atribuye el modelo elegido a la vertical del centro “O” del S.E.V. considerado.

Es obvio que cuando se tienen datos de calibración, éstos se colocan en los modelos teóricos como constantes y se dejan variar sólo los otros parámetros hasta encontrar el “fit” deseado.

Haciendo las mismas operaciones por cada S.E.V. ejecutado al lado de otro, se definen las secciones geoelectricas interpretativas (ver cuadros desde 3AI hasta 3HIV).

En la práctica, la interpretación se produjo de la forma siguiente:

Se aplicó generalmente un método que consiste en comparar la curva obtenida en las mediciones de campo con curvas patrón, elaboradas por aplicación de fórmulas apropiadas, que figuran en numerosas publicaciones científicas (las primeras fueron editadas por el padre de las interpretaciones de las prospecciones en corriente continua el Ing. Orellana).

Estas curvas, muy numerosas, aparecen en catálogos que las agrupan según el número de capas que representan (curvas de dos capas, de tres, de cuatro, etc.) y según configuraciones típicas (familias A, H, K, Q, etc.).

Esta primera fase permitió elegir el número de capas del modelo interpretativo (reduciendo así las variables de la interpretación) y obtener una buena interpretación preliminar.

Después, la electroestratigrafía resultante por cada sondeo, fue comprobada y optimizada en la computadora con un programa que, sin modificar el modelo geológico en input (en la práctica dejando invariable el número de capas), reduce al mínimo el error cuadrático medio de las diferencias entre las curvas de campo y las curvas teóricas.

Los sondeos eléctricos interpretados incluidos en el Anexo 10, tienen, en general, un error cuadrático medio comprendido entre 2% y 4%.

Para un mejor análisis de los datos obtenidos, fueron elaboradas en fase de interpretación las llamadas Pseudosecciones de Resistividad Longitudinal Diferencial. Éstas se elaboran con valores de resistividad aparente medidos directamente en campaña (sin alguna intervención humana de interpretación) utilizando un “normogram” que permite determinar gráficamente el valor de la Resistividad Longitudinal Diferencial según la formula:

$$RLD = \frac{L1 - L2}{\frac{L2}{\rho2} - \frac{L1}{\rho1}}$$

donde:

$$L1 = \frac{AB1}{2}$$

$$L2 = \frac{AB2}{2}$$

$$\rho 1 = \text{resistividad aparente referida a } \frac{AB1}{2}$$

$$\rho 2 = \text{resistividad aparente referida a } \frac{AB2}{2}$$

Este procedimiento que no presenta eventuales errores debidos a la interpretación manual gráfica inicial, es útil para aclarar dudas que puedan surgir en la correlación de los electrostratos. La elaboración de estas secciones particulares se realiza principalmente para obtener una mejor visión sobre la situación electrostratigráfica y para poner en evidencia las discontinuidades laterales en el subsuelo.

Es necesario recordar que estas pseudosecciones dan información de tipo cualitativo y no cuantitativo. Para una lectura en términos cuantitativos, es necesario hacer referencia a las secciones geoelectricas (electrostratigráficas) descritas en el capítulo siguiente e incluidas en los cuadros desde 3AI hasta 3HIV.



## 6.6 Realización de sondeos de exploración y de ensayos de bombeo

### 6.6.1 Realización de sondeos de exploración

Objetivos y cantidades de los sondeos de exploración

El objetivo general de los sondeos de exploración era obtener datos de variada naturaleza útiles para las diferentes actividades del proyecto, en primer lugar las actividades de modelización de los acuíferos en lo que se refiere a la reconstrucción del modelo conceptual de las seis áreas de estudio.

En el contrato estaba prevista la realización de 44 sondeos, divididos en clases según diámetro de la columna de revestimiento y por profundidades, como se indica en el siguiente esquema. El metraje total previsto era de 3250 metros de perforación. Estos sondeos eran a repartir en las diferentes áreas de estudio según las necesidades.

- Sondeos entubados a aproximadamente 7”
  - de profundidad inferior a 75 m # 20
  - de profundidad entre 75 y 150 m # 5
  - de profundidad entre 150 y 225 m # 2
  
- Sondeos entubados a aproximadamente 10”
  - de profundidad inferior a 75 m # 8
  - de profundidad entre 75 y 150 m # 2
  - de profundidad entre 150 y 225 m # 1
  
- Sondeos entubados a aproximadamente 12”
  - de profundidad inferior a 75 m # 3
  - de profundidad entre 75 y 150 m # 2
  - de profundidad entre 150 y 225 m # 1

Durante los estudios ejecutados se individualizaron los siguientes objetivos específicos para los sondeos a perforar en el Valle de San Juan:

- Mejorar el conocimiento geológico-estratigráfico de las áreas de estudio.
- Servir de calibración para la interpretación de la geofísica.
- Adquirir datos relativos a los parámetros hidráulicos de los acuíferos (T, K, S).
- Integrar la red de control piezométrico con pozos dedicados a este efecto.

En relación con estos objetivos específicos y con los de las otras áreas, y tomando en cuenta la realidad de campo, se evidenció la necesidad de modificar en parte el programa original (ver Anexos memorias - Anexo 11).

Esta modificación se realizó una vez que se acordaron con INDRHI e UTG las modalidades específicas para contabilizar los cambios de acuerdo al presupuesto y a los precios unitarios.

De acuerdo con todo esto se realizaron en total 51 sondeos (7 más de los 44 previstos) totalizando 3422.58 metros de perforación (172.58 más de lo previsto). De estos se realizaron en el Valle de San Juan:

- Sondeos entubados a aprox. 7”
- de profundidad inferior a 75 m 13
- de profundidad entre 75 y 150 m -

- de profundidad entre 150 y 225 m	-
Sondeos entubados a aprox. 10”	1
- de profundidad inferior a 75 m	-
Sondeos entubados a aprox. 12”	-
- de profundidad inferior a 75 m	-
<b>Total</b>	<b>14</b>

La ubicación de estos sondeos y un resumen de sus datos se encuentran en la figura Fig. 6.6.1/1 y en la tabla 6.6.1/1.

### **Metodología de perforación adoptada**

Los 14 sondeos de exploración del Valle de San Juan se ejecutaron utilizando, entre las tecnologías aplicadas en el País, las que mejor se adaptaban a las litologías esperadas y a la obtención de los datos requeridos.

Tomando en cuenta estos factores se realizaron entonces:

- 8 sondeos con rotación directa y circulación de aire o espuma;
- 1 sondeo con rotación directa y circulación de lodo (polímero);
- 5 sondeos con método de percusión.

### **Sondeo ejecutado con método a rotación**

Todos los sondeos ejecutados con método a rotación se realizaron según el siguiente esquema:

- a) Perforación con el diámetro adecuado (superior al diámetro final previsto) de los terrenos más superficiales, sueltos o que pudieran tener problemas de estabilidad, hasta encontrar la roca o terrenos más estables;
- b) Introducción de una tubería provisional de diámetro adecuado;
- c) Continuación de la perforación con diámetro reducido (final previsto) hasta la profundidad requerida;
- d) Limpieza del sondeo con aire/agua o productos adecuados en caso de utilización de polímero;
- e) Introducción de la columna de producción con tubos ranurados y ciegos cuya posición se elige en relación con la profundidad, el nivel estático y la utilización prevista del sondeo (observación piezométrica, red de salinidad, bombeo ....);
- f) Introducción de grava entre la tubería y las paredes del sondeo hasta dos metros más arriba de la profundidad donde se encuentran los tubos ranurados más superficiales;
- g) Limpieza y desarrollo del sondeo con aire y/o bomba. Se completa también el relleno de grava si se ha compactado durante estas operaciones;
- h) Realización de un tapón de arcilla de alrededor 2 metros;
- i) Extracción de la tubería provisional;
- j) Relleno del espacio entre la tubería y las paredes del sondeo, por encima del tapón de arcilla hasta 5 metros de la superficie con los rípios de perforación;
- k) Realización de la cementación de los últimos 5 metros para protección sanitaria del acuífero;
- l) Realización en la superficie de una base de cemento cuadrada de 1 metro de lado;
- m) Realización de una protección del tubo de la columna de revestimiento, con un tubo de acero de diámetro adecuado introducido en el cemento de la base, cerrado con tapa y candado.

### **Sondeos ejecutados con método a percusión**

Todos los sondeos ejecutados con método a percusión se realizaron según el siguiente esquema:

- a) Perforación con diámetro adecuado hasta la profundidad requerida con inserción progresiva de una tubería provisoria en acero;
- b) Limpieza del sondeo con “cubo” (cuchara);
- c) Introducción de la columna de producción con tubos ranurados y ciegos cuya posición se elige en relación con la profundidad, el nivel estático y la utilización prevista del sondeo (observación piezométrica, red de salinidad, bombeo ...);
- d) Extracción progresiva de la tubería provisional e introducción de grava entre la tubería y las paredes del sondeo hasta dos metros más arriba de los tubos ranurados más superficiales;
- e) Limpieza y desarrollo del sondeo con bomba y completando el relleno de grava después de la compactación durante el desarrollo;
- f) Realización de un tapón de arcilla de alrededor 2 metros;
- g) Continuación de la extracción de la tubería provisional y del relleno del espacio entre la tubería y las paredes del sondeo, por encima del tapón de arcilla hasta 5 metros de la superficie con los ripios de perforación;
- h) Realización de la cementación de los últimos 5 metros para protección sanitaria del acuífero;
- i) Realización en la superficie de una base de cemento cuadrada, de 1 metro de lado;
- j) Realización de una protección del tubo de la columna de revestimiento, con un tubo de acero de diámetro adecuado introducido en el cemento de la base, cerrado con tapa y candado.

#### **6.6.2 Realización de ensayos de bombeo**

En el área se han realizado 9 ensayos de bombeo, ampliamente descritos en el Anexo 12, y cuyos resultados han sido sintetizados en la Tab.6.6.2/1.

Todos los ensayos han tenido una duración de 72 horas.

En todos los pozos a bombear se han instalado electrobombas sumergidas con alimentación por generadores eléctricos donde no se tuvo la posibilidad de recurrir a la red eléctrica.

El caudal de bombeo se ha elegido de acuerdo con los observados durante la perforación y el desarrollo de los pozos; en caso de utilización de los pozos privados, los caudales estaban ya conocidos.

Para permitir la correcta medida de los niveles, en la mayoría de los pozos se han instalado tuberías de diámetro pequeño como guía para el medidor.

Los niveles durante el ensayo (sea en los pozos sea en los piezómetros de observación), han sido medidos a través de sondas eléctricas con cable plano de 2 conductores e hilo de acero, cuya señal sonora o luminosa indica el contacto con el agua. El hilo está graduado un centímetros.

Todos los pozos se han dejado en paro 24 horas antes de empezar los ensayos, de manera que el nivel estático no fuese afectado de errores y por eso representativos del nivel natural del acuífero.

Para la medida y el ajuste del caudal de bombeo, como es extremadamente importante que quede lo mismo a lo largo del ensayo, se han utilizado recipientes de capacidad conocidas y cronómetros de precisión para la medida del tiempo de llenado.

Con este método, aunque bastante preciso, no se consigue una regulación instantánea del caudal extraído y por eso, cuando ha sido posible, se han empleado contadores totalizadores.

La medición de los niveles ha sido efectuada a intervalos regulares, así que éstos han podido quedar regularmente distribuidos en una escala logarítmica.

Se han tomado todos los cuidados necesarios para que el agua extraída no volviese al acuífero. Por eso el agua bombeada se ha descargado a una distancia mediamente superior a 100 m aguas abajo de la dirección del flujo, a través de tuberías puestas en obra a tal fin, y vertiendo el agua en barrancos, arroyos o canales que no tienen conexión hidráulica con el acuífero.

Al paro de la bomba, después de 72 horas de ensayo, se han medido los niveles en subida, al fin de calcular el parámetro de transmisividad también con los métodos de recuperación, es decir con medida de los ascensos con frecuencia similar a la de los descensos; este método es más preciso por no tener los problemas de las turbulencias generadas por el bombeo.

## 6.7 Integración de la red meteorológica existente

A fin de suplir la información de la red meteorológica existente del INDRHI y de la ONAMET (véanse Anexos Memorias n° 1 y 2), se instalaron 3 estaciones meteorológicas de tipo automático con alimentación por panel solar y con archivo en disco magnético de los valores medidos, es decir: precipitación, temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, dirección y velocidad del viento, evaporación (tanque tipo A).

La instalación de las estaciones meteorológicas fue efectuada en dos distintos momentos:

- en el mes de septiembre del año 1997 se instaló la estación meteorológica de Sabaneta;
- en el mes de agosto del año 1999, consiguientemente a una variante de proyecto, se instalaron 2 estaciones ulteriores:
  - Higerito (Banica - Las Matas de Farfán);
  - El Pinar (El Cercado).

La identificación de los sitios idóneos para la instalación de las estaciones meteorológicas ha sido desarrollada en las siguientes fases:

- selección preliminar, en la oficina, de la distribución óptima de los sitios en los cuales ubicar las estaciones meteorológicas, teniendo en cuenta en particular:
  - el nivel de operatividad y fiabilidad de las estaciones climáticas vigentes;
  - la densidad y la distribución altimétrica de la red vigente;
  - la elevada variabilidad espacial de los parámetros climáticos;

Por cuanto atañe a la selección de los sitios idóneos para la instalación de las ulteriores 2 estaciones meteorológicas, se consideró también la oportunidad de integrar, en la cuenca del río Macasía, la red ya operativa para garantizar tanto un mejor control de áreas afectadas por particulares condiciones climáticas, como la disponibilidad, en el futuro, de datos climáticos fiables y representativos a favor de la utilización del modelo matemático lluvia-escorrentía calibrado en el ámbito del proyecto (véase Anexo Memorias n° 15).

- comprobación en el campo, de la posibilidad de efectuar la instalación considerando distintos factores, como.
  - facilidad de acceso;
  - idoneidad de los sitios (área casi llana, ninguna y/o mínima interferencia de árboles y de infraestructuras existentes o previstas);
  - seguridad contra actos vandálicos;
  - disposición de los dueños de los terrenos a dejar instalar las estaciones.

La inspección ocular en los sitios de interés fue llevada a cabo junto con funcionarios del INDRHI, y en particular con Antonio Ortiz Mena, Encargado de la Sección de Redes.

En el Anexo Memorias n° 2 se presentan la ubicación de las estaciones instaladas, los valores diarios y mensuales de los parámetros climáticos medidos junto al análisis sea del régimen climático, que de la marcha de la precipitación y de la velocidad del viento asociada al paso del huracán George en el mes de septiembre 1998.

## 6.8 Hidrología

### 6.8.1 Campañas de aforos en los ríos y canales

A fin de integrar y completar la información de la red hidrométrica del INDRHI se han efectuado dos campañas de aforos (septiembre 1997 - septiembre 1998, junio 1999 - agosto 1999) en diferentes secciones de los ríos que se encuentran en la zona de estudio, red de aforos del estudio (véase Anexo Memorias n° 13).

El diseño de la red de la primera campaña de aforos, la cual ha incluido también estaciones hidrométricas vigentes y/o suspendidas del INDRHI para alcanzar una distribución espacial óptima, ha sido desarrollado según los siguientes criterios básicos :

- criterios hidrogeológicos: el ingreso y la salida de la zona hidrogeológica afectada, puntos singulares (manantiales o cachones) y/o tramos de intercambio napa-río;
- criterios hidrológicos: régimen previsible de las corrientes de agua (ríos con régimen permanente y/o esporádico);
- criterios hidrográficos: principales confluencias e influencia de la marea;
- criterios económicos: existencia de obras que pueden modificar el régimen natural de las corrientes de agua, es decir: presas reguladoras, sistemas de riego y drenaje, diques derivadores para abastecimiento agrícola y urbano/rural.

Teniendo en cuenta tanto la comprobación en el campo de la posibilidad de efectuar las medidas de caudal, como los conocimientos adquiridos en los primeros períodos del estudio, se han identificado 23 lugares idóneos para efectuar medidas mensuales de caudal.

En la Tabla 6.8.1./1 aparecen los puntos de la red de aforos (evidenciando las secciones no consideradas en la segunda campaña), la ubicación de los cuales se presenta en el Anexo Memorias n° 13.

En el período junio-agosto 1999 se ha efectuado una segunda campaña de aforos en las zonas hidrológico-hidrogeológicas de interés.

El diseño de la nueva red ha sido desarrollado según los siguientes criterios básicos:

- representatividad hidrológica de las secciones consideradas a fin de caracterizar completamente en las zonas hidrogeológicas de interés tanto el régimen hidrológico como el intercambio napa-río, a la luz de los resultados de la primera campaña;
- mejor control del efecto sobre el régimen natural de la escorrentía de los principales canales destinados al riego que actualmente no son objeto de control sistemático;
- verificación de la posibilidad efectiva de efectuar mediciones en el cauce también sucesivamente a las modificaciones hidro-morfológicas consiguientes al paso del huracán George (sept. 98);
- disponer de una red de referencia eficiente y eficaz como sostén para la individuación de la red hidrométrica básica de control (ref. cap. 9.8 y Mapa n° 2).

Sobre la base de lo descrito anteriormente, se han considerado en total 22 secciones de aforos.

En la Tabla 6.8.1./2 aparecen los puntos de la red de aforos, evidenciando las nuevas secciones, la ubicación de los cuales se presenta en el Mapa n° 2 (Red de control hidrogeológico e hidrométrico).

### **6.8.2 Instalación de regletas hidrométricas**

En los Términos de Referencia, estaba prevista la instalación, en los cursos de agua superficiales, de 90 regletas hidrométricas (miras) en las seis zonas de estudio, para renovación e integración de la red de control hidrométrica del INDRHI.

Con el paso del huracán George en Septiembre de 1998, la red existente sufrió daños muy graves, tanto por la destrucción de las infraestructuras que las sustentaban, como por el desvío del curso de muchos ríos. Con estos acontecimientos, se presentó entonces, como prioridad absoluta, la reconstrucción de la red ya existente, con el fin de dar continuidad a las series históricas de medidas.

Todo esto significó un cambio radical en el diseño que se estaba definiendo, y condicionó la tipología de las instalaciones (se tuvieron que construir obras civiles inicialmente no previstas para sustentar muchas de las miras a instalar para la reconstitución de la vieja red de control) y la distribución inicialmente considerada.

La campaña de instalación se llevó a cabo en el segundo semestre del año 1999.

De las 90 regletas disponibles, 12 se instalaron en el Valle de San Juan, distribuidas en 6 estaciones, todas pertenecientes a la vieja red de control del INDRHI.

En la tabla 6.8.2/1 se encuentran los nombres y los datos de ubicación de las 6 estaciones indicadas.

### **6.8.3 Evaluación de la recarga**

Para llegar en la zona hidrogeológica de interés a una estimación de los recursos disponibles de agua subterránea (tasa de recarga) fidedigna y significativa para proporcionar datos que sirvan de base, juntos con otros aspectos del estudio, a la evaluación del potencial aprovechable de los recursos hídricos subterráneos (cap. 6.10.2 y 8) y para la implementación de los modelos matemáticos de flujo subterráneo (cap. 6.12.1 y 7.1.9), nos hemos basado en el siguiente recorrido metodológico (por más detalles, hagase referencia al cap. 2 del Anexo Memorias n° 14):

#### a nivel de zona hidrogeológica:

- individuación de las principales fuentes de recarga del agua subterráneo (recarga pluvial directa, por infiltración de escorrentía superficial, en particular del flujo base, en los cauces, procedente de sistemas acuíferos cercanos en conexión hidráulica y por exco de riego);
- individuación de sub-zonas bastante homogéneas en sentido hidrogeológico (formaciones porosas o fisuradas homogéneas en función de la distribución y tipología de los litotipos permeables que afloran), climático (en particular hacia la marcha de la precipitación), hidrológico y morfológico;

#### a nivel de sub-zona:

- evaluación del área y de la lluvia media hiperanual;
- análisis de las características del medio ambiente que más influyen sobre el ciclo natural del agua (marcha morfológica, desarrollo del retículo hidrográfico, régimen de las corrientes de agua, naturaleza de los suelos y de la vegetación);
- individuación de las estaciones meteorológicas de referencia;
- individuación de la metodología más apropiada para evaluar la tasa de recarga (balance hidrometeorológico y/o descomposición de hidrogramas diarios); metodología relacionada con la comprensión de los factores meteoroclimáticos, hidrológicos e hidrogeológicos que influyen y/o caracterizan al ciclo natural del agua;
- evaluación de la tasa anual media de recarga del agua subterránea, desagregada con referencia a las fuentes de recarga;
- comparación de los resultados obtenidos con aquéllos de otros estudios desarrollados en la misma área y/o en áreas cercanas similares;
- evaluación de la tasa de recarga pluvial directa con referencia a años húmedos y secos de período de retorno asignado (un año de cada 5 y un año de cada 10).

Para el desarrollo del estudio se tomaron en consideración:

- la cartografía hidrogeológica desarrollada en el ámbito del proyecto (Anexo Memorias n° 18 y Mapas n° 9);
- los resultados alcanzados en la caracterización climática e hidrológica del área de estudio (cap. 3 y 7.2);
- la información disponible en estudios desarrollados con referencia a las áreas de interés y/o áreas cercanas cotejables;
- los resultados alcanzados en la caracterización de los suelos (cap. 7.3) y la información disponible respecto a la eficiencia global de riego y al caudal de operación de los principales canales-sistemas de riego encontrada en literatura técnica y facilitada por el INDRHI (División de Manejo de Tierras y Aguas);
- los resultados alcanzados en la implementación de los modelos matemáticos de flujo de las aguas subterráneas (cap. 7.1.9) por cuanto atañe en particular a la sustentabilidad ambiental de los valores estimados de recarga directa relativamente a las distintas sub-zonas hidrogeológicas individuadas.

#### **6.8.4 Estudios hidrológicos - modelización lluvia-escorrentía**

El trabajo de análisis y modelización matemática de las aguas superficiales, desarrollado con referencia a las cuencas de los ríos San Juan (Yaque del Sur) y Macasía, trabajo que integra y completa el análisis hidrológico desarrollado en el Anexo Memorias n° 13 (“Caracterización hidrológica de la zona de estudio (área del Caribe, R.D.)”, consistió en la reconstrucción, mediante el modelo matemático lluvia-escorrentía, de las series históricas de los caudales naturales en secciones de interés de las cuencas arriba mencionadas a fin de suministrar los elementos necesarios para dar apoyo a una gestión sustentable de los recursos hídricos (véanse cap. 8 y Anexos Memorias n° 17 y 20).

La reconstrucción de las series históricas de las escorrentías naturales ha sido efectuada en base temporal diaria mediante la aplicación de un modelo matemático lluvia-escorrentía de tipo conceptual determinístico cuyos parámetros característicos han sido evaluados en función de la variabilidad espacio-temporal de los factores meteo-climáticos e hidro-geomorfológicos que afectan al ciclo natural del agua.



La estructura lógico-matemática y las características funcionales del modelo matemático utilizado (código MIKE-ZERO vers. 4.10, módulo lluvia-escorrentía, del Danish Hydraulic Institute, DHI) están ilustradas detalladamente en los anexos manuales originales en idioma inglés del DHI y, sintéticamente, en el Apéndice I del Anexo Memorias n° 15, junto con consideraciones sobre los valores atribuibles a los parámetros del modelo en sede de calibración y con una breve guía para la utilización práctica del código de cálculo.

La actividad de calibración del modelo matemático se ha desarrollado pues, para cada cuenca, según el siguiente recorrido metodológico (detalladamente ilustrado en el Anexo Memorias n° 15 junto al análisis de los caudales de estiaje):

1. individualización de las secciones fluviales de referencia respecto de las cuales efectuar la reconstrucción de las series históricas de las escorrentías;
2. individuación de las estaciones pluviométricas de referencia (datos meteorológicos de entrada: precipitación);
3. estimación de la evapotranspiración potencial de referencia por medio de la ecuación de Hergreaves-Samani, la cual puede ser elegida, en el área del Caribe de la República Dominicana, como método de referencia para evaluar la evapotranspiración potencial porque tiene el mejor ajuste, en sentido relativo, con la marcha mensual de la evaporación de tanque A (véase Anexo Memorias n° 1);
4. análisis de los datos de caudal medidos (hidrogramas) en las secciones de control para la calibración del modelo matemático;
5. selección de los valores de entrada de los parámetros del código de cálculo para la calibración del modelo (véase el Apéndice I, Anexo Memorias n° 15);
6. calibración del modelo: criterios de control

la calibración del modelo ha sido considerada como satisfactoria cuando resultaban satisfechos criterios de control esencialmente basados en el cotejo gráfico entre la marcha de los valores de caudal medidos y calculados con referencia, para cada año objeto de calibración, al hidrograma anual y a la curva de duración.

Los criterios de control, en condiciones de escorrentía medida natural y/o distorsionada por el uso, así como las modalidades de selección, están detalladamente ilustrados en el Anexo Memorias n° 15.

Los resultados de la aplicación del modelo matemático, también como apoyo de su sucesiva utilización para la evaluación de los balances hídricos (véanse cap. 7.2.2, 8 y Anexos Memorias n° 17 y 20), se han sintetizado en forma gráfica y numérica de la siguiente manera:

- valores promedio mensuales y anuales de las escorrentías naturales históricas reconstruidas junto con sus valores característicos (promedio hiperanual, cv, valores máximos y mínimos);
- hidrogramas en base diaria de los valores del caudal reconstruidos junto, donde existan, con los valores medidos;
- curvas de duración reconstruidas promedio y de años húmedos y de sequía;
- curvas de duración medidas y reconstruidas;
- valores anuales de las precipitaciones y de los componentes superficial (escorrentía torrencial) y profundo (flujo base) de las escorrentías históricas reconstruidas junto con sus valores característicos (promedio hiperanual, cv, valores máximos y mínimos) expresados como volumen de agua equivalente a láminas (mm);
- indicadores hidrológicos de los caudales de estiaje obtenidos del análisis de las curvas de duración reconstruidas: caudal mínimo promedio diario, caudal igualado o

---

superado respectivamente 355, 330 y 300 ( $Q_{300}$ ) días por año, el número de días por año (no necesariamente consecutivos) en los cuales el caudal promedio diario fluente en el cauce es inferior a valores de referencia asignados.

## 6.9 Agronomía - Edafología

El objeto del presente estudio ha sido individualizar, a través de actividades de tipo agronómico y edafológico, las áreas susceptibles de riego, las zonas actualmente con **bajo riego** regadíos y las cantidades de agua subterránea y superficial utilizadas a fines agrícolas.

El estudio ha sido subdividido en dos partes principales: la primera referida a la revisión de las áreas con regadío actualmente presentes en el Valle de San Juan; en el ámbito de esta actividad, se ha efectuado una caracterización del sector agrícola del distrito de riego, a través de la individualización de los principales cultivos efectuados y de las prácticas agronómicas. Las áreas regadas han sido subdivididas en tres grupos: áreas regadas con aguas superficiales, áreas regadas con aguas subterráneas, áreas regadas con sistemas mixtos. aree irrigate sono state suddivise in tre gruppi: aree irrigate con acque superficiali, aree irrigate con acque sotterranee e aree irrigate con sistemi misti. Se han calculado además las necesidades hídricas para cada cultivo.

En la segunda parte del estudio se han individualizado, entre las áreas agrícolas no regadas, aquéllas con mayor o menor susceptibilidad al riego. Para obtener este resultado, se ha efectuado una campaña edafológica, que ha comprendido la ejecución de perfiles, barrenados, muestreos y análisis químicos de los suelos, ensayos infiltrométricos.

### 6.9.1 Campaña agronómica y edafológica

El estudio de cada elemento que caracteriza a un determinado territorio permite individualizar cuáles factores naturales y artificiales (antrópicos) han condicionado la formación y la evolución del ambiente estudiado, y cuánto dicho condicionamiento se ha prolongado hasta hoy.

El análisis de las relaciones existentes entre los factores anteriormente citados permite la subdivisión del territorio en áreas, cada una de las cuales está caracterizada por una diferente combinación de tales factores.

A través de una fotointerpretación preliminar, se han determinado una serie de áreas homogéneas caracterizadas por factores similares.

Después del control en campo, se ha procedido a una revisión de la fotointerpretación preliminar, y sobre la base de los datos recopilados en campo, se ha llegado a distinguir la distribución geográfica de los distintos tipos de suelo.

Se ha procedido además a la recopilación y al análisis del material bibliográfico y cartográfico existente, efectuados en la sede central del INDRHI y en las sedes periféricas.

Se hace presente que la bibliografía hallada está representada por documentación parcial (informes sin cartografía anexa), o por estudios a nivel de hacienda en pequeñas superficies.

El **levantamiento** relevamiento ha sido programado sobre la base de un plan que ha permitido una organización racional de **las actividades de campo** los levantamientos, junto con una homogénea distribución territorial de **las mismas** es.

Se ha adoptado un tipo de **levantamiento** relevamiento denominado “razonado”, es decir que ha tenido en cuenta las características territoriales capaces de influir sobre la génesis de los suelos.

La campaña de **levantamiento** relevamiento edafológico ha consistido en:

### **Individualización de los puntos de observación**

Presuposición fundamental del levantamiento ~~relevamiento~~ “razonado” es la individualización de puntos de observación que puedan ser representativos del territorio objeto de estudio. Los puntos han sido elegidos sobre la base de la fotointerpretación preliminar, del sucesivo control de campo ~~in situ~~ y con la observación de numerosas secciones expuestas, también en las zonas cubiertas por la bibliografía ~~a los~~ fines del control.

### **Ejecución de 2 perfiles**

Para cada perfil se han tomado en promedio tres muestras, sobre las cuales se han efectuado análisis físico-químicos específicos, útiles para la definición de la susceptibilidad al riego. En particular, para cada muestra, se han analizado los siguientes parámetros: ~~In particolare, per ciascun campione, sono stati analizzati i seguenti parametri:~~

textura  
limo  
arcilla  
arena  
conductividad eléctrica  
densidad aparente  
punto de marchitez  
capaciedad de campo  
sustancia orgáenica  
pH  
nitrógeno  
fósforo  
potasio  
carbonato de calcio  
capacidad de interscambio de cationes

**Ejecución de 20 barrenados** para una correcta determinación de la textura de los suelos y para definir mejor los límites de las diferentes unidades cartográficas (ver más adelante es este mismo informe). ~~;~~

Durante la campaña se han cumplido además observaciones puntuales de los suelos, que han constituido una ulterior ayuda ulterior para la definición de las áreas susceptibles al riego;

**Ejecución de 9 ensayos infiltrométricos**, localizados en proximidad de perfiles representativos de cada una de las series de suelo.

### **6.9.2 Identificación zonas con regadío actual y de zonas potencialmente regables**

El estudio realizado ha permitido la producción de un mapa de las áreas irrigadas y de la susceptibilidad a la irrigación, que contiene las siguientes informaciones:

- áreas agrícolas no regadías
- áreas agrícolas regadas con aguas subterráneas

- áreas agrícolas regadas con aguas superficiales
- áreas agrícolas regadas con aguas mixtas
- áreas regadas ocasionalmente con aguas superficiales
- principales cultivos efectuados
- susceptibilidad a la irrigación de las áreas actualmente no regadas.
- localización de los perfiles edafológicos realizados

Para su realización, se han llevado a cabo las siguientes fases de trabajo:  
delimitación de las áreas de estudio sobre la base topográfica en escala 1:50.000;  
fotointerpretación de fotos aéreas en escala promedio 1:40.000 en blanco y negro,  
derivadas de vuelos efectuados en los años 1983/1984; la interpretación ha sido efectuada según el criterio de la predominancia: a cada uno de los polígonos se le ha asociado el cultivo predominante; ~~l'interpretazione è stata effettuata secondo il criterio della prevalenza: a ciascun poligono è stata cioè associata la coltura prevalente;~~

verificación, actualización y terminación de la fotointerpretación a través de investigaciones e inspecciones de campo;

digitalización de las informaciones cartográficas;

construcción del mapa y de la leyenda en ambiente GIS;

asociación a cada polígono de las siguientes informaciones alfanuméricas:

- áreas agrícolas (se trata de superficies brutas, que comprenden taras áreas agrícolas (se trata de superficies brutas, que comprenden taras como carreteras, caminos, canales, terrenos no cultivados), subdivididas en:
  - áreas agrícolas no regadas;
  - áreas regadas con aguas subterráneas (100%);
  - áreas regadas con aguas superficiales (100%);
  - áreas regadas con aguas mixtas (% de agua superficial y subterránea);
  - áreas regadas ocasionalmente con aguas superficiales;
- cultivos predominantes en el momento del estudio, subdivididos así:
  - caña de azúcar
  - sabana
  - sabana-pasto
  - sorgo
  - arroz-frijoles
  - arroz-cultivos mixtos
  - arroz
  - pasto
  - plátano-pasto
  - plátano-hortícolas
  - plátano-cultivos mixtos
  - plátano
  - tomate
  - hortícolas
  - maíz
  - guandul
  - habichuela
  - cultivos mixtos-sabana
  - cultivos mixtos-pasto
  - cultivos mixtos

En el presente estudio se definen además los volúmenes de agua de riego necesarios para los cultivos en el distrito de riego. Los volúmenes de agua han sido determinados mediante la realización de un balance hídrico agronómico en relación con los cultivos presentes.

Para la determinación de dicho balance hídrico se ha adoptado un modelo agronómico, que ha requerido informaciones sobre los suelos, clima y sobre los cultivos en cuestión.

Para calcular las demandas de agua de un área ha sido necesario conocer:

- 1) el área a regar;
- 2) el programa de los cultivos;
- 3) el ciclo vegetativo de cada cultivo;
- 4) la demanda de agua de cada cultivo;
- 5) las precipitaciones y demás aportes hídricos;
- 6) la eficiencia total del sistema de riego.

El balance hídrico permite determinar los probables volúmenes de agua que pueden ser utilizados por los cultivos, mediante la evaluación de la dinámica hídrica total en el sistema suelo-planta-atmósfera en ciertas condiciones agroecológicas dadas.

Los componentes del balance hídrico son: aportes de agua por precipitación y/o riego, sustracciones de agua, como ~~escorrentia~~ ~~escurrimiento~~ escorrentia superficial, percolación o drenaje interno, evaporación y transpiración y el saldo hídrico o cambio de humedad en el perfil del suelo.

El cálculo del balance hídrico señala, en términos generales, períodos de déficit y períodos con exceso de agua.

El período de déficit pone en evidencia el lapso en el cual los cultivos dependerán del riego artificial; el período de exceso, al contrario, da una indicación de la posible existencia de problemas de drenaje superficial y/o subterráneo, cuando no existan condiciones naturales, que facilitan la evacuación de ~~las excedentes~~ las excedentes y a su vez, permite cuantificar el grado de recarga de los acuíferos subterráneos.

Teniendo en cuenta que los datos climáticos están publicados en promedios mensuales, éste es el intervalo adoptado para efectuar el balance; sin duda, dado que la evaporación y los elementos climáticos de los cuales depende (radiación, temperatura, tensión de vapor, etc.) son fenómenos continuos y la precipitación es un fenómeno esporádico, puede haber diferencias notables en el resultado del balance, al alargar o acortar el período.

Un balance hídrico con un intervalo semanal permitiría individualizar períodos críticos, que ocasionalmente aquejan sensiblemente al rendimiento de los cultivos, especialmente cuando, tratándose de cultivos anuales de radicación superficial, las diferencias aumentan con la disminución de las capacidades de almacenamiento del agua durante el período de lluvia.

Para el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos, se ha tratado de suministrar contemporáneamente el dato final (en la forma más agregada posible) y todos los datos de partida, con la posibilidad de formular hipótesis variando los datos de partida, para obtener inmediatamente una respuesta, con la consiguiente variación del dato final. Para satisfacer estas exigencias se ha realizado una hoja electrónica, que se ha mantenido lo más uniforme posible para todas las estaciones meteorológicas consideradas.

A la luz de lo expuesto~~Alla luce di quanto esposto~~, se han elaborado dos tablas: en la primera está calculada la demanda neta de agua, mensual y anual, de cada cultivo, referida a una superficie de 1 hectárea.

En la segunda tabla están calculadas las necesidades hídricas totales, considerando el

orden promedio de los cultivos del trienio 1995-1998. [Esta tablas han sido agregadas al Anexo 16. Queste tabelle sono state riportate in allegato all'Annesso 16.](#)

En fase de elaboración, se ha procedido además a la definición de la susceptibilidad de los terrenos al riego (indicada en el mapa en escala 1:100.000); se ha procedido a la subdivisión del territorio de estudio en clases texturales homogéneas, a fin de suministrar un valor a utilizar como input para la determinación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos.

Para la determinación de la susceptibilidad de los terrenos al riego, se han utilizado los datos procedentes del ~~levantamiento~~ <sup>relevamiento</sup> edafológico; la susceptibilidad se ha visto en efecto como la propensión de un terreno a hospedar cultivos regadíos, considerando la existencia de eventuales limitaciones derivantes de factores físicos y edafológicos, sin tomar en consideración la eventual disponibilidad hídrica o factores de tipo socioeconómico.

La susceptibilidad de los suelos al riego ha sido evaluada según la metodología USBR (1953) que prevé el uso de 6 clases y 3 subclases. La clasificación está estructurada por lo tanto de la siguiente manera:

- |                |   |
|----------------|---|
| <b>Clase 1</b> | Arable: terrenos muy idóneos para la agricultura regadía, capaces de sustentar altas producciones en el tiempo con plantas climáticamente aptas. Alta capacidad de dar rédito – No tiene subclases.   |
| <b>Clase 2</b> | Arable: terrenos moderadamente aptos para el riego. Son adecuados para un menor número de cultivos y necesitan mayores costos de transformación o son menos productivos que los anteriores. Potencialmente tienen una capacidad intermedia de dar rédito.   |
| <b>Clase 3</b> | Arable: están considerados como marginales para el riego y menos aptos que los de la clase 2. Tienen una severa deficiencia o varias moderadas deficiencias en el suelo, en la topografía o en el drenaje. Es posible obtener un rédito satisfactorio sólo con una gestión adecuada.  |
| <b>Clase 4</b> | Poco arables o para usos especiales: tienen deficiencias muy acentuadas que implican costos elevados para superarlas y no garantizan siempre la amortización de los capitales invertidos. Son sin embargo aptos para el riego con plantas de alto rédito y para haciendas de gestión familiar. Si se los utiliza para usos especiales pueden dar réditos superiores a los de las tres clases anteriores.  |
| <b>Clase 5</b> | Terrenos no arables: presentan deficiencias graves como salinidad y/o sodicidad excesiva, drenaje inadecuado, riesgo de desbordes y demás. Estas deficiencias son tan amplias que requieren ulteriores estudios agronómicos, económicos y de ingeniería para determinar su irrigabilidad. Es por lo tanto una clase provisional que podrá ser retrocedida a clase 6 o llevada a una clase arable en el momento en que los ulteriores estudios requeridos y los trabajos necesarios para su restablecimiento den respuestas positivas. |
| <b>Clase 6</b> | No arables: son terrenos con limitaciones que no pueden ser eliminadas como fuertes pendientes, fenómenos de erosión, rocosidad superficial, escaso drenaje, etc. No ofrecen por lo tanto las garantías mínimas requeridas por las clases anteriores y un eventual plan de riego no implicaría nunca una recuperación de los capitales invertidos.  |

Además de las clases indicadas arriba, la clasificación USBR prevé 3 subclases: (s = deficiencias del suelo; t = deficiencias de topografía y d = deficiencias de drenaje) y respectivas combinaciones (st – sd; td – std) las cuales indican los motivos de la colocación de los terrenos en una determinada clase.

En la tabla siguiente están indicados los valores de las clases consideradas; no está presente la clase quinta, porque, dada la amplia área investigada y a disposición para la introducción del riego, no se han tomado en consideración terrenos que habrían impuesto costos demasiado altos para su puesta en cultivo:

SUB CLASES	LIMITACIONES	CLASES (*)				
		1	2	3	4	6
<b>Suelo</b>	Profundidad en cm	>180	180-120	120-80	80-50	<50
	Esqueleto	<5%	5-25%	25-50%	>50%	
	Textura terrenos pesados	F	FA-FL	A	Arcilla alcalina o impermeable	
	Textura terrenos ligeros	F	FS	S	Arena gruesa	
	Reacción terrenos alcalinos	6,6-7,3	7,3-8,4	8,4-9	>9	
	Reacción terrenos ácidos.	7,3-6,6	6,6-5,4	5,4-5	<5	
	Salinidad en mS/cm (ECe)	0-4	4-8	8-15	15-30	>30
	Alcalinidad ESP	0-6	6-10	10-15	15-40	>40
	Permeabilidad en cm/h poco permeables	6-2	2-0,5	0,5-0,1	<0,1	
	Permeabilidad en cm/h demasiado permeables	2-6	6-12,5	12,5-25	>25	
<b>Topografía</b>	Pendiente %	0-5		5-8	8-16	>16
	Erosión	Ausente	Débil	Moderada	Excesiva	
	Nivelado del microrrelieve: en mc/ha	<600	600-1200	1200-2000	>2000	
<b>Drenaje</b>	Inundación	Ausente	Muy rara	Rara	Frecuente	
	Profundidad de capa en cm	>200	200-150	150-100	<100	
	Vías de deflujo de las aguas:	Presentes			Ausentes	

(\*) La 5ª clase no aparece en la tabla siendo una clase provisional

Para la asignación a una clase se elige el valor más limitante: por ejemplo un terreno que tuviera una pendiente mayor del 16% sería asignado a la sexta clase, aunque todos los demás valores pertenecieran a la primera. En la leyenda estaría indicado así: 6t o bien seis la clase, t la subclase que indica un límite topográfico.



## 6.10 Evaluación de la utilización del agua

### 6.10.1 Instalación de contadores volumétricos

En el ámbito de las actividades relacionadas con la evaluación del grado de explotación de las aguas subterráneas (cap. 6.10.2, 7.1.11 y Anexo Memoria n°17), como ayuda para la estimación de los consumos, se instalaron, 2 contadores volumétricos a la salida de pozos para uso doméstico y para riego para cuantificar los volúmenes de agua subterráneas extraídos.

Los contadores volumétricos instalados, modelo WAI de turbina tangencial y paso del agua de flujo libre, son fabricados por la Sociedad ABB-ASTRA CONTATORI s.r.l. de Gavirate, Varese (Italia).

Los contadores arriba citados, de diámetro nominal comprendido entre los 100 mm (4”) y los 250 mm (10”), están diseñados a propósito para la utilización también con aguas de riego y pueden ser instalados en posición vertical, horizontal e inclinada respecto del eje de la tubería, sin que se verifique ningún problema desde el punto de vista de la medición, siempre que el movimiento en la tubería sea de tubo lleno (contador completamente enajenado) y se respeten las distancias de eventuales curvas o compuertas iguales a aproximadamente por lo menos 10 DN por arriba y 5DN por debajo del tramo rectilíneo de tubería. El cuerpo del contador, protegido con pintura epoxídica, es de hierro fundido (UNI G25), el grupo de medida puede extraerse e intercambiarse con varios diámetros diferentes, facilitando las reparaciones y las substituciones. La lectura del volumen fluido, en m<sup>3</sup>, está garantizada por el reloj seco y de lectura directa, protegido por una tapa de metal.

La instalación de los contadores volumétricos fue efectuada en el mes de febrero del año 1999, la identificación de los sitios idóneos ha sido desarrollada en las siguientes fases:

- selección preliminar, en la oficina, de la distribución óptima de los sitios en los cuales ubicar los contadores teniendo en cuenta en particular las características hidrogeológicas de los acuíferos afectados y la tipología y el nivel de las utilidades existentes de manera de individualizar pozos y/o grupos de pozos representativos de las modalidades y de la entidad de las tomas de aguas subterráneas en el territorio de interés;
- verificación en el campo tanto para confirmar la posibilidad de efectuar la instalación (facilidad de acceso e idoneidad de los pozos y de las tuberías), como para definir, en particular para los pozos para riego, eventuales intervenciones estructurales sobre la tubería a la salida del pozo mismo necesarias para garantizar el flujo de las aguas a pleno tubo en correspondencia del contador.

Para los contadores volumétricos instalados, en la tabla 6.10.1/1 se presentan los datos característicos de los pozos objeto de instalación (código, coordenadas, localidad, tipo de bomba, uso, propietario y fecha de instalación y de última lectura) junto con el valor de la lectura final en el contador, la ubicación de los cuales se presenta en el Mapa n° 8.

En conjunto, en el período febrero - septiembre se midieron 295527 m<sup>3</sup> para uso de riego (INDRHI) y 257393 m<sup>3</sup> para uso doméstico (INAPA).

### **6.10.2 Balances hídricos aguas subterráneas**

Se ha procedido al análisis integrado de los resultados de los estudios hidrológico, agronómico y modelístico, tratando por separado las entradas y las salidas del sistema. En particular se ha procedido a un nuevo examen de los valores de recarga, con referencia tanto a las condiciones de un año promedio como a las de un año seco, con tiempo de retorno de 10 años, siendo estas últimas representativas de las situaciones más críticas en términos de recurso aprovechable,. El papel de los cursos de agua (p. ej. alimentación o drenajes) y la entidad de los intercambios con el mundo subterráneo, la evaluación de los flujos a lo largo del área costera) y la evaluación de las explotaciones han completado el cuadro de referencia.

En particular, la evaluación de las explotaciones ha sido objeto de un análisis más pormenorizado. Se trata en efecto de un tema bastante controvertido, condicionado por la general falta de datos exhaustivos y fiables y sobre todo no tratado en otros anexos de proyecto. Los datos disponibles son sustancialmente los de fuente INAPA, por lo que atañe al abastecimiento de la red de acueductos, estimaciones de campo adquiridas a través de entrevistas y evaluaciones indirectas en el curso de las actividades de monitoreo de proyecto, y los datos adquiridos por los contadores volumétricos siempre instalados en el curso del proyecto. Aunque estuviesen presentes en un número más bien limitado; estos últimos han resultado de un cierto interés, también con relación al control cruzado de los datos oficiales suministrados por INAPA.

Los datos demográficos elaborados por la Oficina Nacional de Estadística, han permitido una evaluación indirecta de los consumos potables, teniendo como referencia tanto los estándares de consumo individual normalmente adoptados en la República Dominicana (100-150 l/habitante/día) como hipótesis de variaciones apreciables a nivel local. Un porcentaje adicional ha sido generalmente hipotetizado para tener en cuenta los consumos que atañen a las actividades productivas, comerciales y recreativas.

Por lo que concierne a los consumos para fines agrícolas, se han considerado críticamente los resultados del estudio agronómico (véase Anexo Memorias n°16), con particular referencia a los cultivos practicados, a las exigencias hídricas netas y brutas (con hipótesis de eficiencia total generalmente de alrededor del 30%), a la extensión areal de los cultivos. En particular esta última ha sido evaluada a partir de de las macroáreas individualizadas por el estudio agronómico; el porcentaje de vez en vez realmente cultivado (las macroáreas comprenden en efecto a su vez sectores antropizados – aldeas, carreteras, ... - o sectores no cultivados o abandonados) ha sido evaluado sobre la base de la experiencia de campo y verificado frente a los datos INDRHI disponibles sobre la extensión de los cultivos en el curso de los últimos 3 años. El cuadro se ha completado luego, presentando también los términos de recarga adicional por exceso de riego, que han constituido objeto de calibración en el curso de las actividades de modelización y que son obviamente de particular importancia en áreas con fuerte irrigación con aguas superficiales y litologías superficiales relativamente gruesas.

Se ha concluido el estudio con un examen crítico del balance hídrico, con particular atención en poner en evidencia las condiciones críticas en términos cuantitativos (aprovechamiento elevado respecto de la recarga total) y la división , donde era necesario, en sub-áreas de distinta criticidad.

### 6.10.3 Balances hídricos aguas superficiales

La evaluación de los balances hídricos se ha basado en la interpretación, en escala de zona hidrológico-hidrogeológica y de sub-áreas internas a ellas, del estado que deriva de hecho del balance entre disponibilidades naturales y modalidad y entidad actuales de las utilizaciones, identificando las problemáticas existentes y/o posibles consiguientes a condiciones críticas y de competencia-insatisfacción entre los distintos usos.

Se ha procedido al análisis integrado de los resultados de los estudios

- hidrológico, por lo que atañe a la caracterización de los regímenes naturales de los cursos de agua.
- agronómico, por lo que atañe a la entidad de la hidroexigencia neta de los cultivos en las áreas actualmente regadas con aguas superficiales;
- modelístico (modelo matemático lluvia-escorrentía), por lo que atañe a la caracterización hidrológica (valores históricos naturales reconstruidos en base temporal diaria) de los principales cursos de agua.

Se ha prestado particular atención en la evaluación de las utilizaciones (tomas) del recurso superficial. Se trata en efecto de un componente fundamental y delicado del balance que puede condicionar, aun significativamente, la fiabilidad de los resultados obtenidos. Los datos disponibles y utilizados han sido substancialmente los de fuente:

- INAPA, por lo que concierne al abastecimiento de las redes de acueductos;
- INDRHI, Unidad Manejo de Tierras y Aguas, por lo que concierne a los valores del caudal de operación y de la eficiencia global de riego de los principales sistemas de riego (se recuerda que la eficiencia global de riego es estimada mediante el producto de: eficiencia de conducción del canal principal; eficiencia media de distribución, que abarca la eficiencia de conducción del canal principal en su tramo de distribución y la eficiencia de distribución en laterales desde el canal principal; eficiencia de aplicación de agua en el campo);
- CDE e INDRHI, por lo que concierne a las características hidráulicas de las presas (embalses) existentes.

Como se ha dicho anteriormente, la evaluación del balance hídrico entre oferta natural de los sistemas hidrológicos y actual nivel de las tomas de nuestro recurso hídrico (con relación al sector de riego se han considerado los valores de la hidroexigencia bruta, teniendo en cuenta la eficiencia global de riego, y/o del caudal de operación en cuanto representan el recurso efectivamente derivado, aunque mayor que la cantidad de agua efectivamente necesaria para los cultivos en condiciones de eficiencia optimal) ha sido referida a condiciones hidrológicas promedio y de sequía, con tiempo de retorno de 10 años, siendo estas últimas representativas de las situaciones de mayor criticidad en términos de recurso aprovechable. Del cotejo planteado de esta manera es posible definir para cada sistema fluvial de interés el actual nivel de solicitación antrópica y la verificación de posibles situaciones de riesgo de insatisfacción de los distintos usuarios y de comprometimiento del medio ambiente consiguiente a valores reducidos de la escorrentía residual en el cauce.

Con respecto al impacto de las actuales utilizaciones sobre la escorrentía mínima residual en el cauce, se suministran indicaciones tanto sobre el posible valor mínimo del caudal ecológico, sobre la base sólo de consideraciones de tipo hidrológico como, donde la información disponible era suficiente, sobre el nivel actual de posible criticidad ambiental a través del cotejo entre valores medidos del caudal mínimo en el cauce y valores de

---

posible referencia del caudal ecológico.

## 6.11 Cartografía temática

### 6.11.1 Realización de cartografía hidrogeológica

En el curso del proyecto, para cada una de las áreas objeto de estudio ha sido preparada una cartografía hidrogeológica en escala 1:50.000 (Mapa 9/4 para el Valle de San Juan) que ha constituido una síntesis de actividades que han involucrado a personal especializado en hidrogeología, fotogeología y técnicas informáticas de elaboración cartográfica.

A partir del examen de la bibliografía y de la cartografía existente, se ha procedido a una verificación sistemática de la geología mediante:

- Inspecciones preliminares.
- Fotointerpretación a partir de fotos aéreas.
- Controles de terreno.

La definición de un cuadro geológico de mayor fiabilidad, contextualmente a las informaciones hidrogeológicas adquiridas en el curso del trabajo de campo, ha permitido proceder a la sucesiva caracterización hidrogeológica.

Los criterios de referencia (UNESCO, 1970) han sido seguidos en líneas generales; sin embargo la complejidad y la articulación de las características sobre todo del medio poroso y de los acuíferos que pueden remontarse a las formaciones carbonáticas del sistema arrecifal, han sugerido la oportunidad de una articulación de la clasificación mucho más compleja con subdivisión del territorio sobre la base de las siguientes clases hidrogeológicas:

- Formaciones porosas: acuíferos de permeabilidad muy alta y muy productivos.
- Formaciones porosas: acuíferos de permeabilidad variable y productividad media.
- Formaciones porosas: acuíferos de permeabilidad variable, pero normalmente poco productivos.
- Formaciones fisuradas: acuíferos extensos y productivos (permeabilidad a menudo alta).
- Formaciones fisuradas: acuíferos locales o discontinuos (permeabilidad moderada o variable).
- Acuíferos en caliza arrecifal organógena de permeabilidad elevada de origen primario y/o secundario.
- Acuíferos en caliza arrecifal con litofacies detrítica de permeabilidad de variable a buena, esencialmente de origen primario.
- Acuíferos en sucesiones terrígeno-carbonáticas, donde el componente terrígeno es predominante. Permeabilidad localmente buena.
- Formaciones no acuíferas o con acuíferos muy locales.

Para conocer los detalles, remitimos al Anexo 18 y, para una síntesis, al párrafo 7.1.1.

La cartografía en examen completa el cuadro de las informaciones de relieve hidrogeológico por lo que se refiere a:

- Pozos, distinguidos por tipología (excavados y perforados), por características del

acuífero afectado (freático, artesiano no surgente y artesiano surgente) o bien por resultado final (pozos secos).

- Sondeos.
- Manantiales.
- Piezometría.
- Divisorios de aguas subterráneas.
- Límites de áreas artesianas.

Por lo que se refiere a los aspectos hidroquímicos, se ha decidido suministrar las informaciones relativas a la concentración de los cloruros, en cuanto son indicativas del estado de comprometimiento del sistema subterráneo sobre todo con referencia a los problemas de intrusión de la cuña salina a lo largo de las áreas costeras.

A fin de dar un cuadro más completo, la cartografía presenta, además, los elementos de mayor relieve de la red hidrográfica (ríos perennes, estacionales e intermitentes), comprendiendo lagos, lagunas saladas y embalses. El cuadro está completado por la red de canalización, que en algunos sectores resulta particularmente desarrollada.

En el respeto de los objetivos generales del proyecto, todo el trabajo llevado a cabo ha sido objeto de una informatización completa en plataforma software ArcView -PcArcInfo. Se ha desarrollado la interfase hacia el banco de datos de proyecto, a fin de permitir la representación y la interrogación de los elementos adquiridos sobre todo en el curso de las campañas de monitoreo. Todo lo relativo a la caracterización geológica, tectónica, hidrogeológica e hidrológica ha sido objeto de un proceso completo de digitalización y reconstrucción topológica, e integrado plenamente en el sistema informativo.

### **6.11.2 Realización de cartografía de vulnerabilidad**

La creciente conciencia de que los cuerpos hídricos subterráneos no constituyen una reserva ilimitada, y el progresivo decaimiento cualitativo de las aguas de napa, tanto en naciones de elevada industrialización como en aquéllas de reciente y rápido crecimiento económico, han rendido urgente la necesidad de reducir el impacto ambiental de las actividades antrópicas sobre los recursos hídricos.

En esta óptica la comunidad científica, sobre la base de apropiados elementos de caracterización de los contextos físicos locales, ha elaborado en las últimas décadas algunos métodos de evaluación de los riesgos de contaminación de las aguas subterráneas, con la finalidad específica de planificar las actividades que se realizan en el territorio.

En este sentido se hace necesario introducir el concepto de vulnerabilidad de un acuífero, entendiendo, específicamente, como vulnerabilidad intrínseca la susceptibilidad de las aguas subterráneas de ser alcanzadas, y sucesivamente difundir, un agente contaminador procedente de la superficie. Tal definición prescinde del real contexto de riesgo ambiental y no considera, por lo tanto, la existencia de potenciales fuentes de peligro, las cuales podrían transformar esta “aptitud” de los acuíferos en un riesgo real de deterioro de la calidad de los recursos hídricos subterráneos.

La representación cartográfica conjunta de los centros de peligro potencial y de la vulnerabilidad intrínseca, conocida mejor como cartografía de vulnerabilidad integrada, posee el mérito evidente de dar un cuadro de referencia para la programación más completo respecto de la mera representación solamente de la vulnerabilidad intrínseca.

A esta cartografía pertenecen los mapas de vulnerabilidad realizados, en escala 1:100000, en el ámbito del proyecto.

La posibilidad de que un agente contaminador pueda alcanzar las napas subterráneas, y ser propagado por éstas, es función del sistema físico de la zona, cuya reconstrucción requiere necesariamente una cantidad de informaciones (estratigrafías detalladas, características hidrodinámicas de los acuíferos, desarrollo y tipología de los suelos, etc) no siempre disponibles y cuyo hallazgo no puede proponerse a veces en términos de costos y tiempos.

Por estas razones se recurre al auxilio de métodos de multicriterio mediante los cuales se logra, a través de un sistema de opiniones y valores atribuidos a parámetros físicos distintos (infiltración, tipo de suelo, etc), caracterizar al sistema hidrogeológico examinado, aun con un conocimiento general del mismo sistema físico.

Estos métodos estandarizados, aun necesitando de todas maneras selecciones subjetivas, con relación tanto a la densidad como a la calidad de las informaciones disponibles, que limitan métodos rigurosos o de todas maneras unívocos, permiten, mediante oportunas extrapolaciones e interpretaciones, la comparación entre áreas distintas, definidas sobre la base de la diferente vulnerabilidad.

De las distintas metodologías disponibles, la adoptada en este proyecto, denominada DRASTIC, resulta ser la más ampliamente difundida.

La metodología DRASTIC constituye un método paramétrico que permite, mediante índices numéricos, una evaluación estandarizada de la susceptibilidad a la contaminación de las aguas subterráneas para cargas generales de agentes contaminadores localizables en la superficie,

Una clave del éxito de este método reside además en la facilidad, ofrecida por la evaluación en términos numéricos, de representar cartográficamente la vulnerabilidad misma.

Este método, puesto a punto por la U.S.EPA (United States Environmental Protection Agency) en 1985, debe su denominación al acrónimo derivado de las iniciales inglesas de los siete parámetros considerados como los principales en el control del movimiento de las aguas en los terrenos naturales. Éstos son:

- **D** (Depth of water) - Profundidad al acuífero
- **R** (Recharge Net) - Recarga neta
- **A** (Aquifer Media) - Tipo de acuífero
- **S** (Soil Media) - Tipo de suelo
- **T** (Topography) - Topografía, Pendiente
- **I** (Impact of vadose zone) - Impacto del tipo de zona vadosa
- **C** (Conductivity) - Conductividad hidráulica

#### D Profundidad al acuífero

Representa el espesor de los depósitos que el flujo contaminador debe atravesar antes de alcanzar efectivamente el acuífero. Mayor es la subyacencia, mayor es el tiempo necesario al agente contaminador para llegar a la napa y por lo tanto mayores serán los procesos de atenuación del agente contaminador mismo por dilución, dispersión, filtración mecánica, etc.

### **R Recarga neta**

Representa la infiltración eficaz por unidad de superficie, es decir el volumen de agua meteórica que se infiltra en el suelo por unidad de superficie, al neto de las pérdidas por escorrentía superficial y por evapotranspiración.

Incide sobre la vulnerabilidad dado que el agua representa el agente de transporte de los contaminadores desde la superficie hasta la napa, por lo cual, cuanto mayor es la cantidad de agua que llega a la napa por infiltración, tanto mayor es su vulnerabilidad por la posible difusión de contaminadores.

### **A Tipo de acuífero**

Representa las características del acuífero, en particular la capacidad del medio poroso y/o fracturado de transmitir el contaminador. Ejercita un control importante sobre la longitud del recorrido seguido por el contaminador y sobre la dirección que éste toma, sufriendo ésta la influencia de las variaciones granulométricas y/o de la distribución y orientación de las discontinuidades. De estos elementos dependen los procesos de autodepuración.

### **S Tipo de suelo**

Representa la capacidad de los suelos de oponerse a la movilización convectiva y/o difusiva de la sustancia contaminadora. Debe entenderse como la cobertura superficial de la zona vadosa (1.5 ÷ 1.8 m) e influye tanto sobre la cantidad de agua que puede infiltrarse y alcanzar los niveles que se encuentran por debajo, vehiculando posibles contaminadores, como, donde ésta es bastante espesa, sobre la autodepuración del contaminador por procesos ligados a la filtración, biodegradación y adsorción.

### **T Topografía**

Representa la pendiente de la superficie topográfica, sobre la base de la cual la escorrentía está favorecida o bien impedida. Influye sobre el tiempo de permanencia y sobre la velocidad de flujo del agua de lluvia que llega al terreno reduciendo o incrementando la disponibilidad de agua para la infiltración.

### **I Impacto del tipo de zona vadosa**

Es la zona comprendida entre el suelo (cuando está presente) y la superficie de la napa, donde se realizan procesos de biodegradación, filtración mecánica, reacciones químicas, dispersión, etc.

Este factor influye sobre la dirección seguida por el contaminador para llegar a la napa y, más en general, sobre los procesos de autodepuración de las aguas.

### **C Conductividad hidráulica**

La conductividad hidráulica del acuífero controla la velocidad con la cual las aguas subterráneas fluyen en el medio permeable saturado, bajo un determinado gradiente piezométrico. Ésta depende de numerosos factores, como la granulometría, el estado de condensación, la presencia de elementos estructurales, o discontinuidades en general.

En la aplicación del método, a cada uno de estos factores, relativamente a las clases de variación consideradas, se le ha atribuido un puntaje (rating) a multiplicar sucesivamente por un peso (weight) atribuido por convención al factor mismo.

Los puntajes rinden cuenta de las condiciones de seguridad garantizadas por el factor considerado, que se reducen con el crecimiento del valor numérico.

Los pesos atribuidos a cada uno de los factores DRASTIC varían en función de la



importancia con la cual concurren a la vulnerabilidad intrínseca de un acuífero. A los factores se les atribuyen generalmente los siguientes pesos:

**D 5 - R 4 - A 3 - S 2 - T 1 - I 5 - C 3**

La vulnerabilidad potencial de los acuíferos está expresada bajo la forma de índice numérico (*Índice DRASTIC*) que se obtiene de la expresión:

$$\sum_i r_i w_i$$

con  $r_i$  representativo del puntaje y  $w_i$  del peso relativos al factor considerado.

Mayor es el valor de este índice y mayores resultan ser las condiciones de vulnerabilidad del acuífero en el sector considerado.

Sobre la base de los puntajes previstos y de los pesos atribuidos a los factores considerados, el campo teórico de los índices DRASTIC en las seis áreas de estudio está comprendido entre 26 – 221.

Este intervalo resulta levemente reducido respecto de la extensión del método estándar (23-226) debido a algunas modificaciones introducidas en la atribución de los puntajes, de las cuales se dará una explicación más adelante.

Sobre la base del campo de variación arriba citado se definieron de esta manera las siguientes clases de vulnerabilidad:

<i>Vulnerabilidad</i>	<i>Índice Drastic</i>	
	muy baja	23 - 64
baja	65 - 104	
intermedia	105 - 145	
alta	146 - 185	
muy alta	186 - 221	

La parcial indisponibilidad de los datos relativos a algunos factores limitó la evaluación de vulnerabilidad a áreas reducidas respecto de la extensión de la zona de estudio como está delimitada en la cartografía hidrogeológica de proyecto (Mapa 9/6). El área evaluada corresponde aproximadamente todo el valle con exclusión de los relieves marginales y del sector occidental, cerca del Río Artibonito.

Mientras que, en efecto, para algunos factores la densidad de los datos no implicó limitaciones espaciales a su evaluación (R, A, I y T), en el caso de D y S no estaban disponibles, desdichadamente, datos suficientes a no ser para sectores arealmente más contenidos.

La Conductividad hidráulica (C), constituyó un caso particular: en términos rigurosos este factor resultó ser el de mayor indeterminación por la ausencia generalizada de datos. El artificio necesario de ligar este factor a los puntajes que se atribuyen generalmente en la literatura a litofacies acuíferas análogas permitió no obstante extender su evaluación a toda el área de estudio.

De esta manera la extensión de las áreas sometidas a evaluación de vulnerabilidad resultó estar vinculada a la existencia de los datos relativos a los factores D y S, o por lo menos a la posibilidad de efectuar una evaluación aceptable de los mismos.

Sobre la base de estas premisas, en la cartografía de vulnerabilidad realizada se mantuvieron distinguidas las áreas de mayor atendibilidad de atribución, para las cuales estaban disponibles los datos relativos a todos los factores considerados, respecto de

aquéllas donde se debió forzar de todos modos la interpretación de por lo menos uno de los factores D y S.

La producción cartográfica se realizó a través de un GIS (ARCVIEW de la ESRI) conectado con el Banco de Datos de Proyecto, que suministró, directamente o indirectamente, los valores relativos a algunos de los factores necesarios para la aplicación del modelo DRASTIC.

Para los factores que no podían derivarse automáticamente del Banco de Datos, la adquisición de los mismo requirió su informatización y la creación de archivos gráficos específicos.

La elaboración computada mediante GIS permite una buena integración entre datos de distinta tipología. En efecto, los niveles característicos del DRASTIC prevén el empleo de datos tanto puntuales, como los derivados de sondeos, como lineales, como curvas de nivel, y areales, como los texturales o de recarga.

El método informático aplicado a este tipo de modelo prevé una subdivisión del territorio de estudio según una grilla de unidades espaciales elementales que, en el caso específico, se definió de malla regular cuadrada de 200 m de lado. Este valor resultó ser el mejor compromiso entre densidad de los datos y detalle de representación.

Desde un punto de vista estrictamente conceptual cada uno de los parámetros analizados requirió un planteo específico que puede sintetizarse de la siguiente manera:

#### D Profundidad al acuífero

En el caso de disponibilidad de superficies piezométricas regionalizadas, el valor de la subyacencia se obtuvo directamente por sustracción de la superficie topográfica, como se la reconstruyó mediante DTM.

Cuando en cambio la densidad de las medidas no resultó suficiente para reconstruir con fiabilidad la piezometría local, se procedió a una atribución areal directa de la clase de profundidad en los casos en los cuales los datos disponibles, tanto topográficos como de subyacencia local obtenida de medidas directas, no permitiesen incurrir en errores sustanciales de evaluación

Los datos utilizados fueron los relativos a los niveles piezométricos medios, medidos en los pozos pertenecientes a la red de control piezométrico.

Las simplificaciones introducidas en la regionalización de los datos piezométricos y el paso más bien ancho entre las isohipsas, rindiendo veleidoso el intento de diferenciación ulterior por debajo de los 5 metros de subyacencia, hicieron indispensable simplificar las clases llevándolas a 4 respecto de las 7 previstas originalmente.

Las clases adoptadas, con los puntajes relativos, están sintetizadas en la tabla siguiente:

<i>Rango de profundidades (m)</i>	<i>Puntajes</i>
0 – 5	9
5 – 15	6
15 – 30	3
> 30	1

#### R Recarga neta

Los datos utilizados son los obtenidos de las elaboraciones del Anexo 14 (“Evaluación de la recarga en las zonas hidrogeológicas de interés”).

Los valores de infiltración eficaz se obtuvieron considerando subzonas homogéneas tanto

en términos de precipitaciones medias anuales como por constitución litológica. A los fines del cálculo de la infiltración eficaz, las metodologías adoptadas, para las cuales se remite directamente al informe arriba citado, fueron diferenciadas en función de la disponibilidad y características de los datos meteorológicos de partida.

En la evaluación de la vulnerabilidad se utilizaron los valores calculados por año promedio de la tasa de recarga pluvial directa (recarga neta).

Los valores de las precipitaciones varían levemente desde el oeste hacia el este con disminuciones, por lo menos limitadamente a los sectores con igual cota, del orden de pocos centenares de mm/año. Obviamente, las variaciones con la cota resultan ser en cambio más sensibles, con diferencias entre el fondo del valle y los relieves marginales más altos de más de 500 mm/año. Estando, sin embargo, los sectores investigados confinados principalmente en las cotas más bajas, en un contexto de las precipitaciones como el delineado, el factor litológico juega un papel fundamental en la determinación de manera casi sistemática, de la clase de recarga neta de pertenencia.; los valores más elevados están atribuidos, en efecto, a los sectores de pertinencia de los depósitos aluviales actuales y recientes de los ríos principales (río San Juan, río Macasía-Yabonico), mientras que para las áreas de afloramiento de las secuencias pelítico-margosas neogénicas (Formaciones Sombrero y Trinchera) la recarga neta es casi nula.

Las clases de variación consideradas para este factor corresponden a las canónicas y están sintetizadas en la tabla siguiente:

<i>Recarga neta (mm/año)</i>	<i>Puntajes</i>
0 – 50	1
50 – 100	3
100 – 175	6
175 – 250	8
> 250	9

#### **A Tipo de acuífero**

Los puntajes asignados a los litotipos acuíferos corresponden a las evaluaciones estándares propuestas por la metodología DRASTIC.

En el caso específico del sector de investigación se utilizaron los siguientes criterios.

Se diferenciaron los depósitos terrígenos cuaternarios entre los más gruesos (7) presentes en los valles actuales de los principales ríos locales y sus afluentes (Río San Juan, Río Macasía-Yabonico) y aquellos con presencia de una fracción fina apreciable (6) como se verificó en los depósitos fluviales presentes en la parte central de la cuenca y en los conoides de bajo gradiente que marcan la falla en el borde meridional. También a los depósitos cuaternarios s.l. presentes difusamente en la franja ubicada a los pies de los relieves meridionales se les atribuyó el valor 6.

Las secuencias terrígenas semilitoides de relleno de la cuenca (Fm. Arroyo Seco, Arroyo Blanco y Trinchera) fueron clasificadas con un valor igual a 4, análogamente a las franjas de intensa tectonización, con presencia de texturas de cataclasa avanzada, que bordean a los relieves a la izquierda del río San Juan. Las espesas secuencias conglomeráticas de baja cementación que caracterizan a la Formación Arroyo Seco entre el río Mijo y el embalse de Sabana Yegua fueron consideradas atribuyendo a este sector un valor más elevado (5).

La clase inferior (3) fue atribuida a la formación predominantemente margosa “Sombrero” por su carácter de permeabilidad extremadamente reducida.

En la definición de este factor, los extensos afloramientos de terrenos basálticos que

constituyen las mesetas centrales del área de estudio, fueron considerados de manera marginal, limitando su concurso en la determinación de este factor sólo a los casos en que se pudiese presumir un papel en el sistema acuífero local; la disposición generalmente subhorizontal de esta sucesión de estratos de lava y el contacto suspendido con la formación Arroyo Seco ubicada por debajo respecto de los fondos de valle de los torrentes que cortan a la meseta en cuestión, sin el desarrollo de emergencias de contacto, hace pensar que el acuífero principal se desarrolle principalmente dentro de la formación del substrato. Son una excepción los edificios eruptivos y las inmersiones del estrato de lava por debajo de la cota piezométrica regional; en este caso el valor asignado fue igual a 6.

Los relieves calcáreos (Formación de Neiba) que caracterizan a las laderas del valle no entran en el área de evaluación DRASTIC, a no ser por franjas extremadamente reducidas a las cuales se les asignó el valor 6.

En síntesis, para este parámetro se adoptaron los siguientes puntajes:

<i>Tipo de acuífero</i>	<i>Puntajes</i>
Depósitos aluviales actuales	7
Depósitos cuaternarios s.l.	6
Basaltos cuaternarios	6
Melange tettonico	4
Secuencias terrígenas neogénicas	4 (5)
Sucesión pelítico-margosa miocénica	3
Calizas paleogénicas	6

### **S** Tipo de suelo

Para la definición de este factor se emplearon las clasificaciones texturales de los suelos realizadas en el ámbito del proyecto mismo y representadas en el Mapa 7 (Mapa de las áreas irrigadas y de la susceptibilidad a la irrigación).

Esta clasificación no cubre, sin embargo, toda el área sometida a la evaluación de vulnerabilidad. Por este motivo, sobre la base de las observaciones de campo, de la geomorfología de las áreas y de la naturaleza de los litotipos aflorantes, para asegurar una evaluación lo más extensa posible si bien con grado de fiabilidad disminuido, se atribuyeron puntajes también a zonas originalmente desprovistas de clasificación.

En este sentido, cuando no fue posible extrapolar simplemente el dato de áreas contiguas de igual constitución, las asunciones más importantes están representadas por la asignación del valor 10 a los sectores de la meseta basáltica, donde los suelos resultan poco desarrollados, por la asignación de valores variables entre 2 y 3 , en parte obtenidos a partir de las caracterizaciones texturales locales, de la franja situada a los pies de la montaña en la zona meridional, y por la asignación del valor 7 para el ya mencionado sector con facies conglomerática de la formación Arroyo Seco.

En la tabla siguiente están resumidos los puntajes relativos a todas las clases texturales de los suelos según lo determinado en el curso del proyecto.

<i>Suelo</i>		<i>Puntajes</i>
ausente o bajo	SB	10
esquelético arenoso	ScSa	10
arenoso	Sa	9
esquelético fisurado franco	ScFeFr	8
franco arenoso pedregoso	FrSaPi	7
esquelético franco arenoso	ScFrSa	7

fisurado franco	FeFr	7
franco arenoso	FrSa	6
esquelético franco	ScFr	6
franco	Fr	5
esquelético fisurado arcilloso	ScFeAr	5
franco arcilloso limoso fisurado	FrArLiFe	5
franco arcilloso pedregoso	FrArPi	4
esquelético franco arcilloso	ScFrAr	4
fisurado arcilloso	FeAr	3
franco arcilloso	FrAr	3
esquelético arcilloso	ScAr	3
esquelético arcilloso limoso	ScArLi	3
arcilloso limoso pedregoso	ArLiPi	2
arcilloso	Ar	1

### T Topografía

Las clases de escarpadura se obtuvieron partiendo de la vectorialización de las isohipsas, utilizadas para la reconstrucción de un Modelo Digital del Terreno (DTM) con malla de discretización 200 x 200 m, del cual se obtuvo, mediante un algoritmo de derivación la pendiente de pertinencia de cada una de las celdas.

Los intervalos considerados para las clases de escarpadura y los relativos puntajes asignados, en perfecta adherencia con las asignaciones estándares, están sintetizados en la tabla siguiente.

<i>Pendiente (%)</i>	<i>Puntajes</i>
0 – 2	10
2 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
> 18	1

### I Impacto del tipo de zona vadosa

Utilizando las recomendaciones y los puntajes estándares del método DRASTIC, en el sector considerado se asignaron los siguientes puntajes:

<i>Litología del no saturado</i>	<i>Puntajes</i>
Depósitos aluviales actuales	(6) 7
Depósitos cuaternarios s.l.	6
Basaltos cuaternarios	8
Melange tectónico	3
Secuencias terrígenas neogénicas	4 (6)
Sucesión pelítico-margosa miocénica	3
Calizas paleogénicas	6

A los depósitos cuaternarios se les asignó generalmente el valor 6 por la presencia de un componente fino no despreciable; sólo para los depósitos aluviales actuales con granulometría de los sedimentos más gruesa el puntaje asignado fue más elevado (7). La intensa fracturación vertical (basaltos columnares) de las coladas de lava del sector central, volvió más congrua la atribución de un puntaje elevado (8).

Cuando el estrato aireado resultó en cambio estar constituido por las secuencias marinas y continentales precuaternarias los respectivos valores asignados fueron decididamente más contenidos, 4 para las secuencias terrígenas neogénicas (Formaciones Arroyo Seco, Arroyo Blanco y Trinchera) y 3 para la sucesión predominantemente margosa de la Formación Sombrerito. Sólo en el caso de las espesas secuencias conglomeráticas de la formación Arroyo Seco presentes en el extremo oriental del área, el valor fue incrementado a 6.

Para los pequeños bordes calcáreos de la formación de Neiba el valor atribuido fue 6, mientras que para la franja cataclástica presente en el borde de los relieves septentrionales, por causa del desarrollo de granulometrías muy finas se consideró apropiado el valor 3.

### C Conductividad hidráulica

La escasez de datos relativos a este factor, no permitió una atribución canónica de los puntajes, es decir basada en los valores efectivos de conductividad hidráulica de los acuíferos.

Recordando que los campos de variación considerados en la metodología DRASTIC son extremadamente restringidos, comprendidos entre  $7.10^{-5}$  y  $9.10^{-4}$  en los campos intermedios, resulta claro que, faltando una suficiente densidad de datos al respecto, la variabilidad de este parámetro también en contextos aparentemente análogos no permitió más que una estimación general sobre la base de cuanto era posible obtener para varias tipologías de acuífero de la literatura específica.

Desde el punto de vista operativo se atribuyeron directamente puntajes en función de la facies acuífera, incrementando o reduciendo los puntajes de referencia en el caso en que estuviesen presentes elementos que se consideraba que pudiesen influir sensiblemente sobre la permeabilidad del mismo acuífero (karsismo, fracturación, granulometría, abundancia de la matriz en terrenos sueltos, etc.).

A los acuíferos cuaternarios del área se les asignó un puntaje generalizado igual a 6, diferenciando parte de la franja meridional situada a los pies de la montaña, donde la presencia de un mayor componente pelítico hace que sea plausible la presencia de acuíferos de permeabilidad más contenida (4).

A los pocos sectores donde se puede presumir que el acuífero esté constituido por las vulcanitas basálticas se les asignó el valor 6, análogamente a los pocos bordes calcáreos paleogénicos.

El conjunto de las formaciones precuaternarias (Arroyo Seco, Arroyo Blanco y Trinchera), de permeabilidad reducida, fue evaluado atribuyendo el valor 2, salvo que en la parte oriental, donde la presencia predominante de conglomerados de bajo grado de cementación hizo que fuese más oportuno un incremento del puntaje (3).

Por la escasa permeabilidad que la caracteriza, a la Formación Sombrerito se le asignó el valor 1.

La síntesis de los puntajes atribuidos es la siguiente:

<i>Facies acuíferas</i>	<i>Puntajes</i>
Depósitos cuaternarios s.l.	6
Depósitos cuaternarios franja meridional	4
Basaltos cuaternarios	6
Melange tectónico	2
Secuencias terrígenas neogénicas	2 (3)
Sucesión pelítico-margosa miocénica	1
Calizas paleogénicas	4

Los puntajes obtenidos para cada uno de los factores, permitieron la redacción del mapa de vulnerabilidad en escala 1:100000 (Mapa 10/4), en el cual, además de la clasificación en términos de clase de vulnerabilidad intrínseca, están indicados también los centros de peligro potencial censados en el área de estudio.

En las Figs. 6.11.2/1 y 6.11.2/2 de la Memoria 6 (Península Sur de Barahona) están visualizados como ejemplificación los escenarios relativos a cada uno de los factores que concurren a la evaluación total de vulnerabilidad.

## 6.12 Modelización

### 6.12.1 Modelos matemáticos de flujo de las aguas subterráneas

Se realizó un modelo matemático bidimensional de flujo, mediante el código de cálculo de diferencias finitas Modflow, como cobertura del valle en su totalidad, y por lo tanto de los 2 principales sectores de San Juan, al E, y de Las Matas de Farfán, al O, separados por un alto estructural de rumbo N-S bien evidente en la cartografía hidrogeológica.

El modelo fue calibrado en condiciones estacionarias, teniendo como referencia la piezometría promedio del período 9/97 – 9/98. La actividad de calibración se articuló a partir de un modelo conceptual inicial de máxima, en consideración de la indeterminación de los espesores del sistema acuífero y de la caracterización de los parámetros hidrogeológicos del sistema examinado. Piénsese en general en la deshomogeneidad en la distribución de los pozos y en la profundidad generalmente muy limitada, en un área en la cual se hipotetiza en la bibliografía un espesor de las formaciones sedimentarias muy superior al millar de metros. La actividad de calibración se concluyó, de todas maneras, - a la luz de las limitaciones indicadas – cuando se alcanzaron objetivos de calibración satisfactorios, en términos de concordancia entre piezometría observada y calculada; el resultado fue la definición del modelo conceptual final y del modelo numérico, a utilizarse para los fines de la simulación.

En síntesis, el modelo conceptual final se caracteriza por formaciones que van aumentando de espesor hacia el E (sector de San Juan) y hacia el O (sector de Las Matas de Farfán), a partir del alto estructural en proximidad del pueblo de Pedro Corto. El valle está pues netamente dividido bajo el perfil hidrogeológico, con direcciones de flujo opuestas; hacia el E, en dirección de la cuenca del río San Juan y luego del Yaque del Sur en la primera, hacia el O, o sea hacia los ríos Macasia y Artibonito en la segunda. Obviamente los espesores se van reduciendo también hacia las laderas que dan a los valles (Cordillera Central al N y Sierra de Neiba al S). El esquema está complicado luego por una tectónica compleja, de la cual es expresión evidente el alineamiento que se extiende al S del río San Juan hasta afectar a todo el sector occidental del valle. Por lo que atañe a la permeabilidad se pasa de valores relativamente elevados para las formaciones sedimentarias del sector de San Juan y de las formaciones aluviales recientes asociadas con el río San Juan y sus principales afluentes, a formaciones de permeabilidades medio-bajas y tal vez francamente casi impermeables del sector al S del río San Juan y de buena parte del sector occidental (Matas de Farfán). Se puso en evidencia el papel fundamental de los cursos de agua, y en particular del río San Juan (al E) y del río Macasia (al O), constituyendo ambos la referencia última del drenaje en escala regional. Por lo que atañe a la recarga, se hizo referencia a los resultados del estudio hidrológico, adoptando sustancialmente valores medianos para las formaciones más permeables de la llanura de San Juan y valores de bajos a casi nulos para la parte restante al S del río San Juan y del sector occidental (Matas de Farfán).

El modelo fue integrado con la individualización de las tomas para uso potable (pozos de los centros mayores, como San Juan, Pedro Corto, Las Matas de Farfán), mientras que no existen en cambio áreas de interés turístico. Por lo que atañe al sector agrícola, los cultivos son muy extensos en la parte oriental (llanura de San Juan), inmediatamente al N del río San Juan, y el riego se realiza predominantemente con aguas superficiales. En el modelo, se tuvo en cuenta de esto en términos de recarga adicional por exceso de riego, en un cuadro de todas maneras muy positivo por lo que concierne al recurso subterráneo



aprovechable. La situación es completamente opuesta al S del río San Juan y en todo el sector occidental (Matas de Farfán) donde los recursos subterráneos aprovechables son decididamente menores y falta de todas maneras un sistema de canalización de aguas superficiales. En este caso se introdujeron las áreas agrícolas, individualizadas en el curso del estudio agronómico y las respectivas tomas.

Una sucesiva actividad de modelización se refirió a la extensión del modelo a condiciones transitorias en un período de 30 años de duración. No se trató sin embargo de una calibración propiamente dicha, dado el número exiguo de informaciones acerca de los coeficientes de almacenamiento y sobre todo la falta total de datos históricos de toma. por lo que atañe a las piezometrías históricas existen en cambio algunos datos que confirman la gradual represurización en el curso de los últimos años, pero de todas maneras no son suficientes para los fines de la modelización en transitorio.

### **6.12.2 Utilización conjunta de las aguas subterráneas y superficiales**

Se han analizado los resultados de la modelización de las aguas superficiales (modelos lluvia-escorrentía) y subterráneas (modelos de flujo y de intrusión marina), junto con las informaciones elaboradas y presentadas en el ámbito de la redacción de los balances hídricos en la óptica de una definición de las mejores políticas de uso y manejo conjunto de los recursos hídricos disponibles.

El cuadro conocitivo, delineado en el curso de las distintas actividades del proyecto, ha sido sintetizado, con particular atención por los recursos disponibles en cada sector, por los usos actuales y por las posibles futuras evoluciones de los sistemas de utilización del recurso, y sobre todo en función de las interacciones que caracterizan al sistema superficial y al subterráneo. Se ha dedicado particular atención también a los problemas de tipo cualitativo de carácter regional, in primis los fenómenos de intrusión salina en acto o que podrían ser inducidos o favorecidos por un aumento de las explotaciones de aguas subterráneas a lo largo de las áreas costeras.

Por lo que respecta al sector superficial, los resultados del análisis del balance, en términos de individualización de situaciones críticas de utilización actual del recurso, con el sostén de la aplicación del modelo matemático lluvia-escorrentía, han sido discutidos en detalle y, donde era necesario, integrados a través de la evaluación de ulteriores escenarios de evolución del uso del recurso a nivel tanto de utilización en escala local de nuevos recursos como de ahorro de los mismos a través por ejemplo de un mejoramiento de la eficiencia global de riego a los fines esencialmente de liberar recursos actualmente ocupados devolviéndolos a los sistemas hídricos naturales y mitigando al mismo tiempo el riesgo de insatisfacción de los usuarios en particular en años hidrológicamente secos.

Por lo que atañe al sector subterráneo, los resultados de las simulaciones con modelo matemático (Anexo Memorias n°19) han sido discutidos en detalle y, donde era necesario, integrados a través de la evaluación de ulteriores escenarios de evolución del uso del recurso.

## 7 RESULTADOS OBTENIDOS

### 7.1 Acuíferos y aguas subterráneas

#### 7.1.1 Caracterización hidrogeológica de las diferentes formaciones geológicas

Las formaciones geológicas presentes en el área de estudio han sido caracterizadas desde un punto de vista hidrogeológico utilizando como base de clasificación las especificaciones de la leyenda UNESCO.(1970). Esta base ha sido necesariamente adaptada, articulándola ulteriormente, a fin de adecuarla aún más a las características de los sistemas estudiados.

Es oportuno recordar que, ya que las formaciones están caracterizadas en función de sus reales potencialidades (recursos explotables y luego combinación de los parámetros permeabilidad y recarga), depósitos parecidos por composición litológica han sido considerados de manera diferente dependiendo de su propia posición estructural.

Las formaciones porosas de edad cuaternaria fueron distinguidas en 3 grupos principales:

- Porosas, sede de acuíferos de permeabilidad alta y muy productivos. En analogía con las soluciones adoptadas para todas las otras áreas de estudio, están clasificados en este grupo los aluviones recientes y gruesos asociados con el río San Juan y con sus afluentes más importantes, como los ríos Jinova, Mijo y con el río Yaque del Sur (en la extremidad oriental del área de estudio), localizados en la sub-área oriental. En algunos casos se reconocen bien las terrazas fluviales que limitan a estos depósitos gruesos (ver río Mijo), como también existen evidencias de la existencia de paleocauces, como en el sector inmediatamente al S de la ciudad de San Juan. En la sub-área occidental, hemos optado por una clasificación simplificada, así que no se encuentra en el mapa ninguna formación perteneciente a este grupo. En realidad no se excluye que, a lo largo del río Macasía, se puedan encontrar formaciones sedimentarias más gruesas y conceptualmente remontables a este grupo.
- Porosas, sede de acuíferos de permeabilidad variable y productividad media. Se clasifican en este grupo la mayoría de las formaciones de la llanura de San Juan, desde el divisorio principal de las aguas subterráneas al O hasta el río Mijo al E, y con una extensión en dirección NS desde el embalse de Sabaneta y las formaciones finas de baja permeabilidad que constituyen el límite de la Cordillera Central hasta la gran estructura tectónica que cruza el área de estudio inmediatamente al S del río San Juan. Se trata de un área con grandes cantidades de recursos hídricos subterráneos y, pues, con un importante desarrollo de las actividades agrícolas. En la sub-área occidental continúan a estar clasificadas en este grupo las formaciones cuaternarias que desde el divisorio de las aguas subterráneas se extienden en dirección O hacia el límite con Haití. Relacionadas con los depósitos de los ríos Macasía, Yabonico, Yacahueque, se caracterizan por unos 4-5 km de ancho en el sector central de la llanura, y mucho menos al O del pueblo de Potro Blanco. Considerando el papel drenante que aquí juega la mayoría de los cursos de agua, trátase de áreas de gran interés por lo que se refiere a los recursos hídricos subterráneos; a pesar de esta situación, hasta ahora el desarrollo del sector fue extremadamente limitado, sobre todo cuando se lo compara con la importancia que las actividades agrícolas tuvieron y tienen en la llanura de San Juan.
- Porosas, sede de acuíferos locales y discontinuos, de permeabilidad moderada o baja,

poco productivos. Trátase de la mayoría de los depósitos sedimentarios apenas litificados (tipo Arroyo Blanco, Arroyo Seco) de edad cuaternaria o terciaria tardía; en la sub-área oriental, estos depósitos son los que se encuentran al S de la gran línea tectónica que con dirección ESE-ONO delimita la marcha del río San Juan, en los sectores que dividen la llanura de San Juan del valle del río Yaque del Sur aguas arriba del embalse de Sabana Yegua, y en general en proximidad de las primeras áreas montañosas (pueblo de Las Charcas de Garabito, al E del de Mogollón) como de todas las lomas que al O del río San Juan (aguas arriba de San Juan, hacia el embalse) suben hasta el divisorio de las aguas subterráneas. En la sub-área occidental estas formaciones tienen una extensión mucho mayor; tomando en cuenta también la profundidad de las superficies piezométricas, resulta que los recursos hídricos generalmente explotables son mucho menores.

Las formaciones fisuradas que se encuentran en esta área están constituidas por calizas y margas, por extensos depósitos de rocas magmáticas y vulcano-sedimentarias, y por extensos (en el sentido areal) depósitos basálticos cuaternarios (q'b) de pequeño espesor al NO de la ciudad de San Juan. Trátase generalmente de formaciones ya pertenecientes a la Cordillera Central o a la Sierra de Neiba, y por lo tanto analizadas conjuntamente para las 2 sub-áreas en examen, mientras que las formaciones basálticas se colocan a lo largo del divisorio de las aguas subterráneas y están, pues, en el interior del valle y naturalmente de pertenencia de ambas sub-áreas. De acuerdo con la leyenda de referencia, se distinguen dos grupos de formaciones fisuradas:

- Fisuradas, sede de acuíferos productivos, de permeabilidad a menudo alta. En este grupo se individualizan las calizas de la sierra que, a lo largo de todo el límite SO del área de estudio, separa el valle principal del de El Cercado-El Azul-Vallejuelo, extendiéndose hasta el límite con Haití. Trátase de un área montañosa, que sube hasta los 1600 m, constituida por rocas calcáreas (teo-tmi'c), y cuyo origen está relacionado con fenómenos plicativos importantes (ver los ejes anticlinales en el mapa). En términos generales, esta sierra tiene que ser un área de recarga importante para el valle principal. Por analogía, otras formaciones calcáreas (teo-tol'c), que se encuentran a lo largo o en correspondencia de las grandes líneas de cabalgamiento que limitan al N al valle principal, están clasificadas en este grupo. Las de mayor importancia areal y caracterizadas por el desarrollo de fenómenos kársticos (bien visibles en las fotos aéreas en correspondencia de la loma El Muñeco) se extienden desde el sector del embalse de Sabaneta hasta el límite con Haití al O. Trátase de un área de recarga importante para el valle principal.
- Fisuradas, sede de acuíferos locales o discontinuos, de permeabilidad medio-baja. Hemos clasificado en este grupo todos los basaltos (q'b) que se encuentran por grandes extensiones areales en el sector al NO de San Juan, a lo largo del divisorio principal de las aguas subterráneas (entre las 2 sub-áreas E y O). Trátase de formaciones de interés pequeño o local, tomando en cuenta los espesores relativamente limitados. Las mismas rocas se encuentran también en la extremidad oriental del área de estudio, en proximidad del embalse de Sabana Yegua (valle del río Yaque del Sur). Siempre a lo largo de las grandes líneas de cabalgamiento que limitan al valle principal al N, aparecen otras formaciones constituidas por conglomerados bien litificados (tmi'cg) y, de gran extensión areal, rocas magmáticas y vulcano-sedimentarias (k'mgm).

El último grupo es relativo a:

- Formaciones de baja permeabilidad y sin acuíferos significativos. Comprende, en el sector S del área de estudio, todas las formaciones con predominantes intercalaciones margosas (tmin-s'm+car, tms' Mm). Trátase generalmente del área al S de la gran línea tectónica que cruza toda el área de estudio con dirección ESE-ONO. El contraste con el área de llanura del río San Juan es evidente, con condiciones generales de sequía, un desarrollo de las actividades productivas casi insignificante y muy pocos pozos perforados. En el sector septentrional del valle, y siempre a lo largo de las grandes líneas de cabalgamiento, se encuentran principalmente formaciones flyshoides, con areniscas y margas, y también con intercalaciones de conglomerados y holistoestromas (ks-tol'FI), que se consideran también de pertinencia de este grupo.

La determinación a través de los ensayos de bombeo de algunos parámetros hidrogeológicos (tab.6.6.2/1) de las principales formaciones acuíferas ha evidenciado cómo los valores de T oscilan entre máximos de  $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  y mínimos por debajo de  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  o sea con variaciones de 4 ordenes de magnitud.

Los valores mayores se encuentran en todo el sector E de la llanura de San Juan, o sea: a O de San Juan, hacia Pedrocorto y al E e al N del Río San Juan; desafortunadamente no hay ningún dato al sur de la ciudad de San Juan y por lo tanto nos limitamos a la hipótesis de valores pequeños de T refiriéndonos al mapa hidrogeológico.

En la parte O del valle (Matas de Farfán - Elías Piña) los valores de T son generalmente mucho más bajos, en acuerdo también con las indicaciones de la cartografía hidrogeológica.

El valor en absoluto más bajo se ha medido en proximidad del pueblo de Elías Piña. Única excepción es el dato en proximidad de Las Matas de Farfán, que pero es representativo de las formaciones aluviales gruesas del Río Macasía y por lo tanto no tiene un significado regional.

Los coeficientes de almacenamiento están comprendidos entre  $10^{-3}$  y  $10^{-4}$ .

### 7.1.2 Pozos, sondeos y manantiales

Los pozos se concentran, en el sector oriental del valle, en la llanura de San Juan, al N de la gran estructura tectónica, que limita la marcha del curso del río San Juan. Trátase de pozos perforados en capa acuífera libre o semiconfinada, en condiciones generalmente muy favorables, ya que los niveles piezométricos (ver Piezometría más adelante) resultan generalmente próximos a la superficie del terreno. Son una excepción los pozos ubicados en las áreas topográficamente más elevadas o en correspondencia de sectores de divisorios de aguas subterráneas (ej. el sector oriental entre los pueblos de Sabana Piedra-Sabana Alta y el embalse del río Yaque del Sur). Sin embargo, es al S de la citada estructura tectónica que las condiciones se modifican radicalmente; sector seco y sin ninguna actividad agrícola de importancia, se encuentran sólo pocos pozos de pequeña importancia.

Es diferente la situación en el sector O del valle, entre Haití y el gran divisorio de las aguas subterráneas y superficiales que, en proximidad del pueblo de Pedro Corto, se extiende en dirección NS. Las condiciones son generalmente secas y los pozos están concentrados en general en los acuíferos aluviales no confinados. Además, existen también pozos en sectores topográficamente más elevados e hidrogeológicamente desfavorables. Trátase normalmente de pozos para abastecimiento doméstico o pequeñas actividades agrícolas.

En el curso del proyecto no se han individualizado manantiales relevantes en el área de estudio. Estudios antecedentes (Planiacas) han evidenciado sin embargo la existencia en correspondencia de los relieves septentrionales, especialmente los de naturaleza

calcárea, de manantiales que alimentan directa la red hidrológica local.

### 7.1.3 Piezometría

#### **Piezometría y variaciones piezométricas en el tiempo**

La piezometría observada y utilizada para la calibración de los modelos matemáticos es visible en el Mapa 11/4 (ver Entrega final – Mapas – Mapas Piezométricos) y/o en el Mapa 9/4 (ver Entrega Final – Mapas – Mapas Hidrogeológicos)

Considerando que el valle se caracteriza por la presencia de 2 sub-áreas hidrogeológicas bien distinguidas, también sus piezometrías están analizadas separadamente.

#### **– Sector Este del valle (al Este de Pedro Corto)**

Este sector está caracterizado por niveles piezométricos generalmente próximos a la superficie topográfica. Además, considerando el papel drenante de los principales cursos de agua (y en particular del Río San Juan) y las condiciones freáticas del acuífero, este sector se caracteriza por un comportamiento piezométrico estrictamente relacionado con los niveles de los ríos. Los gradientes son generalmente pequeños (orden de 5 por mil) ya sea en la zona al O de Pedro Corto-Torre, como en la zona E y aguas abajo de la ciudad de San Juan. Los datos disponibles están concentrados en las áreas del fondo del valle, en correspondencia con las producciones agrícolas principales, y no permiten pues un análisis de detalle del comportamiento piezométrico regional. Sin embargo, también en ausencia de datos, se puede presumir un esquema general constituido por gradientes fuertes y direcciones de flujo desde el N, por efecto de la recarga que se produce en la Cordillera Central, y generalmente niveles piezométricos parecidos a los de los ríos en correspondencia con los depósitos cuaternarios, considerando las fuertes relaciones río-acuífero (ej. valle lateral Sabaneta-San Juan, al S del embalse de Sabaneta).

Bien distinta es la situación del área al S del gran alineamiento tectónico que se extiende por toda el área de estudio, limitando al S el curso del río San Juan. Este sector constituido por una alternación de formaciones porosas de baja permeabilidad y formaciones casi impermeables, está caracterizado por condiciones generalizadas de sequía. Pocos son los pozos y, por lo tanto, los datos piezométricos, así que no se puede diseñar una piezometría. La estratificación, con inclinaciones moderadas (25-30 grados) en dirección N-NE, tiene que jugar un papel determinante en el comportamiento piezométrico general, junto con las zonas de recarga al S a lo largo de la Sierra de Neiba y, en la proximidad del valle, en las lomas calcáreas que la separan del área de El Cercado-El Azul-Vallejuelo. A partir de todo esto se pueden imaginar gradientes en dirección N-E, aunque se esté en presencia de acuíferos discontinuos y localmente confinados.

El divisorio principal de las aguas subterráneas que limita al O la sub-área examinada se encuentra cerca de los pueblos de Las Charcas de María Nova y de Pedro Corto y se extiende en dirección N, cruzando las lomas de rocas basálticas (q'b). Otro divisorio se encuentra en el límite oriental del área de estudio entre los valles del Río Mijo y del Río Yaque del Sur, con su embalse de Sabana Yegua. Otros divisorios existen en el sector S, ya fuera del área estudiada; en la proximidad de sus límites. Entre éstos, vale recordar el que separa el valle principal del valle de El Cercado-El Azul-Vallejuelo, según el eje principal de dirección ESE-ONO de las formaciones calcáreas (teo-tmi'c). Las líneas de

flujo confluyen desde el N (Cordillera central) y desde el S (Sierra de Neiba) hacia el centro del valle, donde se observa una convergencia de las direcciones de flujo en dirección del Río San Juan (que juega aquí un papel evidentemente drenante) desde el O-NO hacia el E-SE.

#### – **Sector Oeste del valle (al Oeste de Las Charcas de María Nova y Pedro Corto)**

Este sector desde el divisorio principal de las aguas subterráneas, está caracterizado por un desarrollo mucho menor de las actividades antrópicas y, por consiguiente, de las mismas perforaciones. Considerando también la extensión del área, se dispone de datos suficientes para diseñar una piezometría general, lo que evidencia el papel drenante del río Macasía con líneas de flujo que, de forma parecida a lo que pasa en el sector precedente, se extienden desde el N (Cordillera Central) y desde el S (Sierra de Neiba), para modificarse hacia el O-NO, según el curso del río Macasia. Los gradientes también permanecen del orden del 5 por mil .

A parte del divisorio principal de las aguas subterráneas entre las 2 sub-áreas, otro divisorio se encuentra, en nuestra opinión, en el sector N del valle con dirección E-O, y con grandes evidencias en la red hídrica superficial. Se trata de una separación entre el valle principal (del río Macasia) y el valle que se encuentra en el margen S de la Cordillera Central, en correspondencia con el alineamiento Sabana Cruz-Los Memisos.

Las calizas (toe-tmi'c) al S, como las lomas de rocas basálticas en la extremidad oriental, y las formaciones que pertenecen a la Cordillera Central al N, constituyen, a nivel regional, las áreas de alimentación del sistema hídrico subterráneo.

Por lo que se refiere al análisis de las variaciones piezométricas en el tiempo, vista la no disponibilidad de datos históricos en forma y cantidad adecuada, se tomaron en cuenta las medidas hechas en el período anterior al ciclón George (septiembre de 1997 – Septiembre de 1998).

En la figura 3.4/1 se visualiza la distribución de los valores piezométricos máximos y mínimos a lo largo del año hidrológico.

Los mínimos se observan esencialmente en los meses de Mayo y de Febrero.

Los máximos, por otro lado, tienen mayor frecuencia en Noviembre y se sitúan esencialmente entre Octubre y Enero.

Las variaciones anuales son generalmente muy reducidas (en mayoría inferiores a 1 m): las máximas observadas no superan los 2.5 metros (solamente en 1 pozo cerca de Elias Piña se observó una variación anómala superior a los 3 metros) y se sitúan fuera de los acuíferos aluviales en posiciones marginales.

Por lo que atañe a las variaciones de los niveles medios después de 1970, no se tienen datos para poner en evidencia la evolución de los mismos.

Para tener indicaciones sobre los efectos de las lluvias del último año donde hay que tomar en cuenta los eventos relacionados con el huracán George, se analizaron los valores medios de los niveles piezométricos en Junio, Julio y Agosto de 1998 (antes del ciclón) y los del período Junio, Julio y Agosto de 1999. Los resultados se pueden resumir así:

Se ha observado un aumento de las cotas piezométricas con una variación media de 55 cm. Las cotas subieron en el 82.4% de los puntos, con una variación en gran parte inferior a los 70 cm (en el 58.8% de los puntos)

#### **Proposición de una red de control piezométrico**

En esta área los puntos aptos para la ejecución de medidas piezométricas, ilustrados en el Mapa 2/4, son en total 54. De estos, el 57.4% (31 puntos) no tienen bombas instaladas: el restante 42.6% (23 puntos) están equipados con bombas.

La red de control escogida cuenta con 22 puntos, de los cuales 12 (55%) dedicados solamente a la red y 10 (45%) privados. Los puntos de la red sin bomba son 20 (91%) y con bomba instalada son 2 (9%).

En esta área se ha podido lograr la proposición de una red casi ideal, donde la gran mayoría de los puntos no están equipados con bombas, por lo cual las medidas serán influenciadas de forma muy marginal por su utilización (manual cuando exista). La repartición en el espacio de los puntos propuestos está de acuerdo con los criterios generales más arriba indicados: se concentran principalmente en las aluviones del fondo de los valles, aunque algunos puntos de control están ubicados en zonas marginales (acuíferos secundarios en las formaciones continentales plio-pleistocénicas).

#### **7.1.4 Calidad de las aguas subterráneas - caracterización hidroquímica**

El objetivo de la hidroquímica es suministrar un cuadro de las tipologías de las aguas subterráneas presentes en una región y verificar su estabilidad en el tiempo.

El programa de muestreo llevado a cabo en el arco del proyecto, articulado en cuatro campañas repetidas en los límites de lo posible en los mismos puntos, permite efectuar para cada área y en cada uno de los puntos un doble análisis, en función del tiempo y en función de la distribución areal.

Para un análisis rápido y funcional, los resultados analíticos de las cuatro campañas se transpusieron en el diagrama de Stiff (ver Anexos Memorias - Anexo 6), representando en cada ficha todos los análisis repetidos en el tiempo en el mismo punto de la red. En cada diagrama, para indicar la campaña de muestreo relativa a la representación gráfica de la muestra, al número de inventario del pozo se le agregó “/1, /2, /3, /4”, por ejemplo, la muestra 1001/1 se refiere a la primera campaña.

Este tipo de diagrama permite representar, con una poligonal cerrada, la tipología química de la muestra de agua y, contemporáneamente, tener el valor de la concentración de cada uno de los seis iones mayores, expresada en meq/l.

La clasificación hidroquímica propuesta fue redactada sobre la base del diagrama de Piper.

Desdichadamente, las informaciones litoestratigráficas no son suficientes para la codificación de una clasificación tan articulada, por lo tanto a nivel de interpretación se consideraron las familias principales sin ahondar en sus subdivisiones.

Para la redacción del “Mapa de la caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas” (Mapa 4), se tuvo en cuenta la composición predominante de cada uno de los puntos en el arco de las cuatro campañas efectuadas.

En total, en las cuatro campañas efectuadas se tomaron 108 muestras

En esta área la red de control resulta estar constituida por 35 puntos. En general las aguas de esta zona presentan una composición química estable aun comprendiendo distintos tipos hidroquímicos. En la representación gráfica de Piper (Fig. 7.1.4/1-a,-b,-c,-d



) la clasificación comprende:

El cuadro general resulta estar caracterizado por aguas con salinidades inferiores a 0,8 g/l, y con una elevada estabilidad en la composición química, relativamente al período de observación.

En la representación gráfica de Piper la clasificación comprende:

- aguas bicarbonato-alcálico-térreas;
- aguas bicarbonato-alcálicas;
- aguas clorurado-sódicas.

La peculiaridad de la zona está dada por la presencia masiva de aguas de tipo bicarbonato-alcálico, mientras que el tipo hidroquímico de todas maneras más difundido es el típico, o sea el tipo bicarbonato-alcálico-térreo.

Las aguas clorurado-alcálicas están representadas por sólo tres muestras, todas ubicadas alrededor del centro poblado de S. Juan.

De la investigación específica sobre la calidad potable de las aguas subterráneas emerge cómo (véase Anexo 8) su utilización para acueducto de las aguas subterráneas está realizado tanto en el distrito de San Juan de la Maguana como en el de Elías Piña, y son numerosos también los centros menores que aprovechan los recursos subterráneos como fuente para el abastecimiento de aguas potables.

Toda la zona de estudio no muestra particulares sufrimientos, por lo menos en la parte axial del valle, por lo que se refiere al hallazgo de aguas subterráneas con adecuadas características de potabilidad.

Este cuadro resulta estar articulado de manera diferenciada entre el sector oriental, en el cual predominan acuíferos aluviales actuales y recientes, con buenas características de permeabilidad y buena alimentación, y el sector occidental, en el cual están mayormente representados los acuíferos terrígenos neogénicos de potencialidades más reducidas y con aguas de calidad inferior.

En las partes marginales del valle, se resiente mucho de la tipología del acuífero y de la capacidad de las formaciones superiores de representar una fuente alimentadora adecuada.

Los problemas principales subsisten fundamentalmente en la ladera meridional, entre el Río Yaque del Sur y la población de Estancia, en correspondencia de las formaciones terrígenas precuaternarias, donde las litologías demuestran ser poco aptas para hospedar capas acuíferas de discreta productividad.

En general se observa que los puntos hídricos con decaimiento de la potabilidad de las aguas son más bien discontinuos y atribuibles generalmente a la intermitente superación de los límites de potabilidad relativos al Residuo Fijo y a los Nitritos/Nitratos.

El Residuo Fijo resulta ser el parámetro de criticidad mayormente recurrente en el sector occidental tanto en las cercanías de Elías Piña como a lo largo del curso del Río Artibonito.

Esta situación puede remontarse plausiblemente a la presencia en la zona de litofacies acuíferas de mayor solubilidad dentro de las formaciones terrígenas neogénicas.

Relativamente al sector oriental al O de San Juan, en las cercanías de la aldea de Arroyo Loro, el comprometimiento de las aguas de capa resulta ser permanente y ocurre en todos los pozos monitoreados; los parámetros que determinan dicho decaimiento (Residuo Fijo y Magnesio) deben vincularse más plausiblemente al contexto natural más

bien que a los efectos de una contaminación antrópica.

Es más bien singular el dato relativo a las aguas en la zona de Cardón – Pueblo Nuevo donde el elevado contenido salino y la presencia no tolerable de los cloruros hacen prever que el comprometimiento deba referirse a la presencia de sales evaporíticas, no necesariamente de origen primario, en el área considerada.

Toda la zona en el lado izquierdo del Río San Juan no muestra en cambio presencia, ni siquiera parcial, de situaciones críticas.

#### **7.1.5 Salinidad e intrusión marina**

Vista la colocación interna, para esta área no se planteaban problemas ligados a la intrusión marina y por lo tanto no se ha llevado a cabo ninguna actividad específica en tal sentido.

#### **7.1.6 Resultados análisis isotópicos**

Las muestras de esta área ponen en evidencia una notable variación de la composición isotópica de la recarga. No habiendo evidentes vínculos entre composición y ubicación de los puntos de toma, las causas de la variabilidad de la composición parecerían ser debidas a la presencia de áreas de recarga con cota media diferente. La mayor parte de las muestras resulta sujeta a fenómenos de evaporación, probablemente en fase de infiltración.

El cociente  $O18 - Cl$  y  $Na - Cl$ , para los únicos dos puntos de los que se dispone de los análisis químicos, confirman la presencia tanto de aguas evaporadas (4031) que han sufrido fenómenos de evaporación (18 O enriquecido y Cl elevado) como de aguas que han lixiviado evaporitas o depósitos salinos (4046), caracterizadas por un Oxígeno-18 empobrecido, pero por un elevado tenor de ion Cl.

La evaluación de la cota promedio de recarga basada en la correlación indicada en la bibliografía [Febrillet H. J., Bueno E., Seiler K. P., Stichler W., 1987. Estudios Isotopicos e hidrogeologicos en la region suroeste de la República Dominicana. Simp. Int. Viena Austria 30/marzo- 3 abril 1987, IAEA-SM-299/031] indica que las muestras pertenece a circuitos recargados en un franja altimétrica comprendida entre los 600 y los 800 metros.

El contenido de Tritio relevado indica la presencia tanto de aguas actuales como de aguas infiltradas antes del pico de Tritio de 1961.

Los valores de Carbono determinados confirman que estas aguas tienen seguramente un tiempo de almacenamiento largo, las edades calculadas varían entre 1100 y 2500 años para la muestra 4891, y entre 3000 y 4400 años para la muestra 4896.

#### **7.1.7 Relaciones ríos-acuíferos**

La hidrología del Valle de San Juan individualiza la separación entre una sub-área occidental, la cuenca del río Macasía-Artibonito, y una oriental, la cuenca del río San Juan, afluente del río Yaque del Sur.

Los principales cursos de agua del Valle juegan un papel drenante de los sistemas acuíferos, como se puede apreciar del análisis de los caudales medidos en las secciones de aforo en condiciones de agua baja (véase Anexo Memorias n 13).

La contribución media del flujo base constituye un 40-60% del flujo total por los ríos San Juan, Mijo y Macasía (véase Anexo Memorias n° 15), hecho seguramente indicativo de un papel drenante del sistema acuífero jugado por los ríos Macasía y San Juan, mientras que se reduce de alrededor del 30% por el río Tocino, flujo de base que llega de los sistemas acuíferos fisurados también al exterior de la zona hidrogeológica de interés (véase Anexo Memorias n°13).

### **7.1.8 Evaluación de la recarga - infiltración eficaz**

La zona hidrogeológica de interés, la cual se presenta en la Fig. 7.1.8./1 sacada del Mapa 9/4: Mapa hidrogeológico Valle de San Juan, tiene un área total de 2567.9 km<sup>2</sup>, una precipitación promedio anual de 1077.3 mm y una evapotranspiración potencial de referencia de 1679.0 mm así repartida:

- zona oeste (sector Macasía-Tocino): área de 1384.4 km<sup>2</sup>, precipitación promedio anual de 1173.6 mm y evapotranspiración potencial de referencia de 1700.5 mm;
- zona este (sector de San Juan): área de 1183.5 km<sup>2</sup>, precipitación promedio anual de 967.3 mm y evapotranspiración potencial de referencia de 1655.6 mm.

La zona hidrogeológica de interés se caracteriza, por lo que atañe a las áreas de recarga directa, por formaciones porosas (azul), de permeabilidad de alta (terrenos de aluvión del río San Juan y de sus principales afluentes) a baja, y por formaciones fisuradas (verde), con acuíferos de permeabilidad de alta a baja, las cuales, en conjunto, tienen una superficie de 1846.6 km<sup>2</sup>, esto es el 72% de la superficie total.

En términos generales, las aguas subterráneas proceden de tres fuentes:

- recarga pluvial directa;
- recarga por flujo de retorno de aguas de riego (exceso de riego) e infiltración en canales;
- recarga lateral, con referencia al sector central de la frontera sur (Sierra de Neiba).

En conjunto, teniendo en cuenta las características morfológicas, hidrogeológicas e hidrológicas, han sido individuadas 21 sub-zonas homogéneas (véase cap. 6.8.3, Fig. 7.1.8./1 y Anexo Memorias n° 14).

Para evaluar la tasa de recarga se tomaron en cuenta los parámetros obtenidos del análisis:

- de la marcha climática medida en las estaciones meteorológicas de Cajulito, Pozo Hondo, Puertecito, Matayaya, Ranchito Macasía, Sabaneta, Guazumal, San Juan y Cacheo, con referencia en particular a la recarga pluvial directa en formaciones porosas;
- de los hidrogramas de las estaciones de Cajulito, río Tocino-Artibonito, de Puertecito, río Macasía y de Paso de Lima, río San Juan-Yaque del Sur (Anexo memorias n° 14), con referencia a la recarga pluvial directa en formaciones fisuradas;
- de los caudales medidos en la sección de aforo de Pozo Hondo, río Yacahueque, con referencia a la recarga pluvial directa en formaciones fisuradas.

En la tabla 7.1.8./1, para cada sub-zona, aparecen los valores de la tasa de recarga pluvial directa con referencia al año medio y años secos y húmedos de período de retorno

asignado, un año de cada 5 y un año de cada 10.

En conjunto la recarga pluvial directa en la zona hidrogeológica de interés alcanza los siguientes valores:

- años secos (T=10 años):  $166.28 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a};$
- años secos (T=5 años):  $190.77 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a};$
- año medio:  $243.52 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a};$
- años húmedos (T=5 años):  $282.81 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a};$
- años húmedos (T=10 años):  $314.04 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a}.$

así repartidos entre zona oeste (sector Macasía-Tocino) y este (sector de San Juan):

- zona oeste (sector Macasía-Tocino):
  - años secos (T=10 años):  $91.46 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a};$
  - años secos (T=5 años):  $103.72 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a};$
  - año medio:  $130.87 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a};$
  - años húmedos (T=5 años):  $150.75 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a};$
  - años húmedos (T=10 años):  $167.71 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a}.$
- zona este (sector de San Juan):
  - años secos (T=10 años):  $74.82 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a};$
  - años secos (T=5 años):  $87.05 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a};$
  - año medio:  $112.65 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a};$
  - años húmedos (T=5 años):  $132.06 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a};$
  - años húmedos (T=10 años):  $146.33 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a}.$

Por lo que atañe a la recarga promedio anual por flujo de retorno de aguas de riego (exceso de riego) e infiltración en canales, ésta ha sido evaluada teniendo en cuenta:

- una eficiencia total promedio de los sistemas de riego alrededor del 40% en el sector de San Juan y del 30% en el sector del río Macasía;
- el caudal de operación de los sistemas de canales.

La recarga media anual resultó ser:

- sector de San Juan (en parte sub-zonas 7, 13, 14, 15 y 18):  $24.60 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a};$
- sector Macasía-Tocino (en parte sub-zonas 8, 9, 10, 11 y 12):  $8.03 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a}.$

En conjunto la recarga media anual total en la zona hidrogeológica de interés alcanza el valor de  $276.15 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$  así repartido:

- recarga pluvial directa:  $243.52 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a};$
- recarga por exceso de riego:  $32.63 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a};$

Por lo que atañe a la recarga lateral procedente de sistemas acuíferos cercanos en conexión hidráulica, es decir de las áreas arriba de las sub-zonas 4 y 5, teniendo en cuenta sus características climáticas y morfológicas, se puede considerar un valor de la recarga directa pluvial cotejable con aquéllos evaluados con referencia a las sub-zonas 4 y 5.

### 7.1.9 Modelos matemáticos de flujo

El modelo de flujo, realizado a lo largo del proyecto, fue utilizado para la evaluación del impacto sobre el sistema acuífero, para la hipótesis de una extensión de la red de acueductos de las ciudades de Juan de Herrera y de San Juan (sector E) y un desarrollo generalizado de las actividades agrícolas en el área próxima al río Macasia (sector O), A pesar de las incertidumbres, esta simulación tiene un objetivo cualitativo de carácter general, o sea la evaluación del diferente impacto que las explotaciones tienen en los fértiles sectores orientales y en las formaciones porosas de baja permeabilidad del sector occidental. Obviamente esta simulación constituye la base para cualquier otra simulación más específica, relacionada con un aumento de consumos sea en campos pozos existentes que en campos de nueva realización.

En detalle los aumentos de explotación estimados fueron de aproximadamente  $2.2 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año, en el sector entre Juan de Herrera y San Juan, a lo largo de 5 pozos de nueva construcción, y de aproximadamente  $1.1 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año, uniformemente distribuida en un área del orden de 95 km<sup>2</sup>, a la izquierda del río Macasia desde el área de Las Matas de Farfán y Elías Piña;

Los resultados son de gran interés, indicando impactos muy limitados en el sector E entre Juan de Herrera y San Juan, con variaciones piezométricas limitadas a máximos de 1.3-1.4 m. Es evidente que el río San Juan juega aquí un papel fundamental como condición en el entorno, según las informaciones disponibles y por los resultados del modelo matemático (balance de flujo). En el caso específico, el flujo de base desde el acuífero hacia el río se reduce por efecto de las explotaciones.

Por lo contrario, a pesar del pequeño (y uniforme) aumento de los consumos para una discreta extensión areal, el sector occidental se caracteriza por variaciones piezométricas parecidas y tal vez superiores (máximos del orden de los 3 m). Trátase de un resultado congruente con las características hidrogeológicas modestas de las formaciones porosas aquí presentes y obviamente indica una gran criticidad frente a explotaciones fuertes y concentradas. Además este resultado indica también una gran criticidad frente a proyectos de interés agrícola, tomando en cuenta las exigencias hídricas de los cultivos principales de este sector.

### 7.1.10 Recursos hídricos y reservas hídricas

El sistema acuífero subterráneo del Valle de San Juan se caracteriza por presentar condiciones muy variables, en términos de recurso potencialmente aprovechable. El sector nororiental del valle, o bien la llanura de San Juan (desde Pedro Corto hasta el límite oriental del área de estudio) en todo su desarrollo al N del río San Juan, está caracterizada en efecto por formaciones permeables, con una recarga importante (directa, desde los ríos, los canales, por exceso de riego) y condiciones muy favorables. Al contrario, el sector oriental al S del río San Juan y el occidental (Las Matas de Farfán) se caracterizan por predominancia de formaciones finas, a veces predominantemente arcillosas, con recarga reducida y condiciones generalmente desfavorables. La recarga directa por infiltración ha sido estimada en el ámbito del estudio hidrológico (Anexo Memorias n° 14) en un valor total del orden de los  $243.5 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año sobre una superficie total útil de 1847 km<sup>2</sup>, con referencia a un año promedio. Se trata de un dato promedio que debe ser desagregado espacialmente, a la luz de las consideraciones anteriores, distinguiendo netamente la llanura de San Juan de los sectores al S del río San Juan y al O del valle. Se trata de un valor de todas maneras mayor respecto del utilizado en el

ámbito de las actividades de modelización ( $135.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ ), simplemente porque estas últimas conciernen exclusivamente a los sectores de llanura. En las condiciones más críticas de años secos con tiempo de retorno igual a 10 años, el valor total estimado en el orden de los  $166.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$  (-32% respecto de la referencia promedio anterior) se reduce significativamente.

Téngase en cuenta que a nivel de conceptualización, el valle constituye la base del drenaje regional, tanto para la Sierra de Neiba (al S) como para la Cordillera Central, al N. Por lo tanto se podrían estimar también contribuciones de recarga adicional, por subida desde acuíferos más profundos y recargados directamente por los relieves circundantes.

Por último el papel de los cursos de agua, el río San Juan al E y el río Macasía al O; y de todas maneras el de todos los afluentes asociados. Se trata de cursos de agua que alimentan el sistema acuífero subterráneo en los sectores marginales del valle, en correspondencia de los conoides aluviales o de todas maneras en los tramos con cotas más elevadas. Ellos, sin embargo, representan también, en gran escala, la base del drenaje regional. Esto resulta evidente tanto de la disposición estructural del valle como de la marcha de las piezometrías, que indican direcciones de flujo desde el N (Cordillera Central) y desde el S (Sierra de Neiba), convergentes hacia el centro del valle en correspondencia de los ya citados cursos de agua. El comportamiento drenante está ampliamente confirmado por los resultados del estudio hidrológico, que dispone de estaciones de medición de los caudales en la salida de ambas cuencas (San Juan y Macasía), frente a valores en juego decididamente elevados.

Obviamente, además de la referencia al año promedio (utilizado en el curso de las actividades de modelización de las aguas subterráneas) debe tenerse en la debida cuenta la referencia al año seco con tiempo de retorno igual a 10 años, en cuanto es representativo de las condiciones de mayor criticidad.

#### **7.1.11 Utilización de las aguas subterráneas**

Las explotaciones son en esta área de entidad decididamente limitada. El centro urbano principal (San Juan) está alimentado por pozos ubicados al N del mismo (en dirección del centro poblado de Juan de Herrera), y muchos de los pequeños centros poblados tienen a disposición pozos para uso doméstico y potable (aunque con caudales totales relativamente contenidos). El valor total es también en este caso de difícil determinación; aunque sólo los datos INAPA (Vallejuelo, Juan de Herrera, Rosario Cardón) indiquen caudales totales de todas maneras muy limitados (inferiores a los  $2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ ). A esto agréguesele de todas maneras que también estos datos podrían estar sobreestimados, en el orden de un 30%-50%, según lo verificado en otros lugares a partir de las medidas tomadas por los contadores volumétricos. Como ejemplo, se ha verificado para el pozo de Vallejuelo (ubicado en un sector marginal del valle) un caudal total anual del orden de los  $467000 \text{ m}^3/\text{año}$  contra los  $676000 \text{ m}^3/\text{año}$  de fuente INAPA.

En general se estima que las tomas para uso potable son generalmente limitadas en la casi totalidad de los centros urbanos, en razón de la general falta de campos de pozos importantes y de sistemas de aducción y distribución capilares.

Es de todos modos el sector agrícola el que juega un papel fundamental en el sector nororiental de la llanura de San Juan, con cultivos extensos y de hidroexigencia

relativamente elevada. Pero se trata también de un área en la que predomina ampliamente el uso de recursos hídricos superficiales, en razón de una red de canales muy desarrollada, y para la cual frente a tomas subterráneas limitadas resulta en cambio fundamental el componente de recarga por exceso de riego.

En el sector al S del río San Juan, y en todo el sector occidental (Las Matas de Farfán), las actividades agrícolas son en cambio muy reducidas y por lo general destinadas a la subsistencia local. Se deduce, también en línea con las estimaciones de la recarga y de las características hidrogeológicas desfavorables de las formaciones cartografiadas, que las tomas subterráneas para fines agrícolas son de entidad más bien limitada.

El examen cruzado de las estimaciones de recarga (ref. estudio hidrológico) y de las estimaciones de las tomas (ref. estudio agronómico – evaluaciones sobre los usos potables), indican evidentemente que las tomas constituyen una fracción despreciable de la recarga total, sobre todo a la luz de la utilización predominante de recursos hídricos superficiales (sector nororiental de San Juan) y del desarrollo agrícola muy reducido de los demás sectores.

La evaluación cuantitativa de la entidad de las explotaciones, ya discutida anteriormente, es obviamente muy compleja, por la substancial falta de datos exhaustivos y fiables. En el ámbito del proyecto recordamos que nos hemos concentrado en un esfuerzo de recopilación, sistematización y verificación crítica de datos existentes (por lo general de fuente INAPA) y de nuevos datos (a través de estimaciones directas en campo, entrevistas con la población local, evaluación indirecta sobre la base del tamaño de las cisternas o bien del número de familias abastecidas por eventuales obras de captación). El único dato directo y cierto es el de los contadores volumétricos instalados en el curso del proyecto. Estos contadores están presentes en número relativamente exiguo y no pueden (ni debían) suministrar un cuadro exhaustivo de los consumos. Sin embargo ellos han permitido una verificación de las estimaciones indirectas disponibles, poniendo en evidencia diferencias apreciables en términos de porcentaje respecto de los datos INAPA.

En rápida síntesis, recordamos que los datos INAPA indicarían un aprovechamiento total del orden de los  $5.9 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/año, incluyendo tanto fuentes superficiales como subterráneas (de todas maneras minoritarias). Por lo que concierne a las estimaciones de campo, hasta ahora no comentadas, el valor global de los consumos resulta ser del orden de los  $1.7 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/año; se trata en realidad de pozos generalmente con caudales muy pequeños, para un abastecimiento hídrico a nivel local. En efecto, a un examen más atento, los únicos pozos con caudales apreciables (casi el 90% de los  $1.7 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/año totales indicados) son los ubicados en correspondencia del centro poblado de Yayas de Viajama, fuera del área de estudio. Por último, los contadores volumétricos participan en la evaluación de las tomas totales, sobre todo por su función de control cruzado respecto de las estimaciones indirectas o de las informaciones directas de distinta procedencia.

### **7.1.12 Vulnerabilidad**

Los resultados de la aplicación del método DRASTIC en el área de estudio, reproducidos en el Mapa 10/4, delimitan un cuadro de la vulnerabilidad local que puede detallarse de la siguiente manera.

En el sector de estudio la vulnerabilidad es generalmente baja, con áreas de vulnerabilidad más elevada en los sectores de desarrollo de los depósitos clásticos

cuaternarios.

En general el desarrollo principalmente agrícola del área en cuestión, con actividades industriales contenidas y limitadas sólo a los procesos de transformación alimenticia, no determina situaciones de riesgo particularmente evidentes con relación a las actividades productivas.

En detalle, la distribución de las áreas de distinta vulnerabilidad intrínseca resulta ser más bien articulada.

En la estrecha franja meridional situada a los pies de la montaña, al sur de la gran falla de borde del valle aluvial, las reducidas extremidades de depósitos cuaternarios, generalmente finos, y una estructura representada por formaciones de baja permeabilidad, determinan, por lo menos hasta La Estancia – Las Matas de Farfán, una vulnerabilidad local que varía desde baja hasta muy baja. Esta situación hace que no sea, compatiblemente con lo que emerge de la evaluación DRASTIC, particularmente crítica la presencia de la descarga de residuos urbanos ubicada a pocos kilómetros al NE del pueblo de Cardón.

En la misma franja, en dirección de la frontera con Haití, otros centros de peligro se observan en los territorios de Las Matas de Farfán y Elías Piña donde están presentes otra descarga de residuos urbanos (Las Matas de Farfán) y algunos surtidores de combustible, cuyas colocaciones son tales que garantizan de todas maneras un buen grado de protección para los acuíferos que se encuentran por debajo. En este sector la situación se vuelve más articulada con aparición de áreas de vulnerabilidad media confinadas en los locales depósitos aluviales.

En la parte central y septentrional del Valle de San Juan, la vulnerabilidad se vuelve tendencialmente mayor, de baja a media, con aparición de amplias áreas de vulnerabilidad alta, tanto en correspondencia de los lechos aluviales actuales de los principales cursos de agua locales, como de áreas con depósitos fluviales más antiguos (por ejemplo en el tramo Arroyo Loro – Pedro Corto), en los cuales la evaluación local refleja sensiblemente la escasa profundidad de la napa.

El impacto de la ciudad de San Juan, el principal centro poblado del área de estudio, desarrollándose en el valle del río homónimo, resulta ser más bien crítico, vista una colocación en un sector de alta vulnerabilidad. En este distrito no están censadas sin embargo actividades de elevado riesgo, salvo algunos surtidores de combustible situados en el ámbito ciudadano.

En los otros sectores de vulnerabilidad elevada, el escaso desarrollo de centros tanto poblados como productivos, no determina la existencia por el momento de situaciones de una cierta preocupación.

Los riesgos más concretos acerca de la calidad de las aguas subterráneas en los sectores de vulnerabilidad más alta, derivan de la superposición parcial con los sectores de intenso aprovechamiento agrícola. En este caso el impacto de las sustancias empleadas para fines de cultivo podría ser elevado y este hecho necesitaría una evaluación específica (DRASTIC agrícola), presuponiendo también una específica distinción de los distintos cultivos en función de un mayor o menor impacto ambiental.

La amplia meseta basáltica desarrollada en el sector centro-septentrional muestra en cambio condiciones de protección elevada para el acuífero regional, que se encuentra a profundidades más bien elevadas en los terrenos de permeabilidad contenida de la formación continental Arroyo Seco. Esta situación no considera sin embargo el impacto sobre los limitados acuíferos locales que, visto el marcado contraste de permeabilidad entre las coladas basálticas y los densos depósitos terrígenos que se encuentran por



---

debajo, podrían desarrollarse en condiciones geométricamente favorables.

## 7.2 Aguas superficiales

### 7.2.1 Régimen hidrológico y recursos hídricos

La hidrología del Valle de San Juan individualiza la separación entre una sub-área oriental, la cuenca del río San Juan, afluente del río Yaque del Sur y una sub-área occidental, la cuenca del río Macasía-Artibonito (véanse p'ar. 7.2.3 y Anexos Memorias n° 13 y 15).

La sub-área oriental, la de mayor importancia tanto por los recursos hídricos superficiales como por los subterráneos, está caracterizada por el río San Juan y por una serie de afluentes perennes (escorrentía natural), como los ríos Jinova, Mijo y Los Baos.

Por lo que atañe al rendimiento, aparece una repartición clara entre las vertientes norte y sur. La vertiente norte, donde son alimentados los ríos San Juan, Jinova y Mijo, es más lluviosa y los ríos tienen rendimientos elevados (en la cuenca del río Mijo el rendimiento alcanza un valor de casi 32 l/skm<sup>2</sup>); la vertiente sur, en cambio, se encuentra más seca, tiene un bajo rendimiento, el río Los Baos tiene el valor más bajo en el área de estudio ( $q = 6.72$  l/skm<sup>2</sup>).

La potencialidad hídrica natural total del río San Juan es elevada, indicativamente comprendida en Sabana Alta entre los  $525 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a (año seco, T=10) y los  $712 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a (año promedio), Tab. 7.2.1./1; sin embargo el elevado nivel de utilización del recurso hídrico para fines de riego en la cuenca implica una significativa reducción de la escorrentía en el cauce, como se expone detalladamente a continuación en el pár. 7.2.2.

La sub-área occidental está caracterizada por un sistema de drenaje que confluye en el río Macasía, afluente del río Artibonito que delimita también el límite de estado con Haití. Entre otros, se encuentran el arroyo La Celibe (desde el límite oriental de la sub-área), los ríos Los Naranjos, Caño y Comendador en el lado sur, y los ríos Yabonico y Yacahueque en el lado norte. Cañadas secas y arroyos se encuentran en gran número en todo el sector de interés.

La cuenca del río Macasía, la cual en conjunto tiene un rendimiento menor que la cuenca del río San Juan, presenta una discreta potencialidad hídrica natural, indicativamente comprendida en Rinconcito entre los  $299 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a (año seco T=10), y los  $514 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a (año promedio), Tab. 7.2.1./1, sin embargo la utilización del recurso hídrico para fines de riego en la cuenca implica una discreta reducción de la escorrentía en el cauce, como se expone detalladamente a continuación, pár 7.2.2.

Por lo que atañe a la identificación de la entidad promedio mensual de la escorrentía torrencial y del flujo base, fue preciso basarse en los resultados de la aplicación de los modelos matemáticos lluvia-escorrentía (véase pár. 7.2.3 y Anexo Memorias n°15) por los cuales resultó:

#### cuenca del río Yaque del Sur - San Juan:

- río Yaque del Sur en El Puente, una contribución media del flujo base alrededor del 71% de la escorrentía total ( $cv = 0.30$ );
- río Mijo (San Juan) en El Cacheo, una contribución media del flujo base alrededor del 48% de la escorrentía total ( $cv = 0.16$ );
- río Los Baos (San Juan) arriba confluencia con el río San Juan, una contribución

- media del flujo base alrededor del 79% de la escorrentía total ( $cv = 0.35$ );
- río San Juan en Paso de Lima, una contribución media del flujo base alrededor del 59% de la escorrentía total ( $cv = 0.12$ );
- río San Juan en Sabana Alta, una contribución media del flujo base alrededor del 56% de la escorrentía total ( $cv = 0.18$ );

cuenca del río Macasía:

- río Macasía en Ranchito, una contribución media del flujo base alrededor del 54% de la escorrentía total ( $cv = 0.34$ );
- río Macasía en Rinconcito, una contribución media del flujo base alrededor del 45% de la escorrentía total ( $cv = 0.30$ );

### 7.2.2 Utilización de las aguas superficiales

La demanda de recurso hídrico superficial en el Valle de San Juan resulta articulada de la siguiente manera (véanse Tablas 7.1.11./1 y 7.2.2./1-2):

- cuenca del río San Juan:
  - para aprovechamiento urbano (aguas potables): caudal de explotación comprendido entre  $16.3 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$  y  $32 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$  (INAPA);
  - para riego: la hidroexigencia neta, con exclusión de la sub-cuenca del río Vallejuelo, puede estimarse en aproximadamente  $180 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$  (equivalente a una demanda bruta del orden de los  $450 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ , eficiencia global de riego de alrededor del 40%, valor cotejable con el conjunto de los caudales máximos promedio de los canales de riego, igual a  $13 \text{ m}^3/\text{s}$  equivalentes a  $410 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ ).
- cuenca del río Macasía:
  - para aprovechamiento urbano (aguas potables): caudal de explotación comprendido entre  $3.8 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$  (INAPA);
  - para riego: la hidroexigencia neta puede estimarse en aproximadamente  $62 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ , (equivalente a una demanda bruta comprendida entre 248 y  $310 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ , eficiencia global de riego entre el 20 y el 25%, valor cotejable con el conjunto de los caudales promedio de operación de los canales de riego, igual a aproximadamente  $9.8 \text{ m}^3/\text{s}$  equivalentes a  $296 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ ).

Sobre la base de la entidad de la oferta hídrica natural y de la actual hidroexigencia, el balance hídrico del Valle de San Juan resulta:

- cuenca del río San Juan:

como se ha recordado anteriormente, el grado de explotación de las aguas superficiales, en particular para fines de riego, es muy alto en la cuenca del río San Juan, como se encuentra en la fig. 7.2.2./1 donde se coteja la marcha de la escorrentía mensual promedio medida y reconstruida natural (mediante modelo matemático lluvia-escorrentía, en los años 1983 y 1986-92 en la estación hidrométrica del INDRHI de Sabana Alta; con referencia a dicho período, la reducción de la entidad de la escorrentía en el cauce puede estimarse en aproximadamente  $300 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ , igual al 42% de la escorrentía promedio natural total, reducción que es, pero, inferior a la captación total estimada (aproximadamente  $500 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ , igual al 70% de la escorrentía promedio natural, teniendo en cuenta también de los canales del río Vallejuelo) por efecto de la entrada a los cursos de agua naturales de parte de las aguas de exceso de riego.

El río San Juan presenta, por lo tanto, en su conjunto, una utilización neta del recurso hídrico superficial bastante consistente, superior al 40% de la escorrentía promedio natural anual, situación representativa de un nivel de utilización del recurso tendenciosamente crítico, aun manteniéndose la escorrentía natural total con valores mayores que los de las tomas brutas totales (que pueden estimarse en aproximadamente  $466-482 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ ) aun en años secos.

Sin embargo, resultando el entero sistema Yaque del Sur en condiciones de hecho críticas de utilización del recurso hídrico, situación de demanda total muy próxima al promedio, por lo cual se puede concluir que la situación más frecuente de hecho es la de sequía de tipo socio-económico (véase Anexo Final n° 5), ulteriores utilizaciones de los recursos hídricos superficiales en la cuenca del río San Juan podrían dar lugar a situaciones de desequilibrio no tanto en la cuenca misma, sino aguas abajo en particular en el sector Los Guiros-Palo Alto. Por este motivo también en la cuenca del río San Juan, en las actuales condiciones de utilización de los recursos hídricos en escala de cuenca total del Yaque del Sur, no son hipotetizables nuevas tomas de aguas superficiales, siendo no despreciable el riesgo de posibles interferencias con otros usuarios existentes, en particular en años hidrológicamente secos.

Por lo que atañe al riesgo de posibles comprometimientos ambientales en el cauce del río San Juan, sobre la base del actual nivel de utilización del recurso superficial, no parecen emerger situaciones de particular criticidad. En efecto, la escorrentía diaria promedio medida en Sabana Alta, en el período 1980-83 y 1986-92, resulta comprendida entre  $1.28 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $3.89 \text{ m}^3/\text{s}$ , con un valor promedio igual a  $2.59 \text{ m}^3/\text{s}$ , valores cotejables con el del caudal ecológico que, sobre la base de consideraciones sólo de tipo hidrológico, debería ser por lo menos igual a  $2.26 - 3.04 \text{ m}^3/\text{s}$  (Anexo Memorias n° 17, Apéndice A).

Refiriéndose en cambio a específicas situaciones que se encuentran en el interior de la cuenca, se puede observar:

- río Mijo. el actual nivel de utilización para fines de riego de las aguas ( $Q$  operación =  $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) resulta bastante compatible con la oferta natural de la cuenca, el caudal de operación resulta garantizado en promedio por lo menos en 166 días/año (Anexo Memorias n° 15) al bruto del caudal ecológico, por lo menos igual a los  $0.45 - 0.52 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- río Los Baos en Vallejuelo: teniendo en cuenta tanto el actual nivel de utilización para fines de riego de las aguas, que puede evaluarse en el 55% de la escorrentía natural promedio, como del vínculo aguas abajo constituido por el canal Vallejuelo II, la escorrentía en el cauce, ya en el año promedio, resulta completamente utilizada y en años secos resulta aun significativamente deficitaria (condiciones de sequía socio-económica);
- cuenca del río Macasía:  
como se ha recordado anteriormente, el grado de explotación de las aguas superficiales, en particular para fines de riego, es bastante alto en la cuenca del río Macasía, aunque es en conjunto inferior al de la cercana cuenca del río San Juan. Las obras de toma más significativas, en términos de caudal de operación de los canales de riego, se encuentran en la sub-cuenca del río Caño (alrededor del 60% del caudal de operación total de la cuenca entera) y en el río Macasía entre Ranchito y Rinconcito (canal Rinconcito de Macasía).

Hipotetizando, en analogía a la cuenca del río San Juan, que aproximadamente el 35-40% de las aguas derivadas para riego fuese drenado por los cursos de agua naturales, la utilización neta del recurso hídrico superficial en la sección de control de Rinconcito resultaría igual a aproximadamente  $180-190 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ , equivalente al 36% de la escurrentía promedio natural anual y al 62% de la escurrentía natural relativa a un año seco con período de retorno de 10 años, situación representativa de un nivel de utilización tendenciosamente crítico, en particular en años secos. Situación de riesgo de criticidad mayor por insatisfacción de los usuarios, en particular en años secos, si se consideran en cambio las tomas brutas, que pueden estimarse en su conjunto en aproximadamente  $300 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ .

Ulteriores utilizaciones de los recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Macasía, al neto de acuerdos específicos con la República de Haití, podrían dar lugar a situaciones de desequilibrio, con relación a la cuenca dominicana, en particular en años secos.

Por último, por lo que atañe al caudal ecológico, sobre la base de consideraciones sólo de tipo hidrológico, debería ser por lo menos igual a:

- río Macasía en Ranchito:  $0.71 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- río Macasía en Rinconcito:  $1.63 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### 7.2.3 Modelos matemáticos lluvia-escurrentía

Sobre la base de la información climatológica disponible se han reconstruido las escurrentías naturales diarias en correspondencia de las secciones de:

- río Yaque del Sur en El Puente (vieja estación del INDRHI, código 490001), período 1968-1969, 1972, 1974-1978 y 1984-1994 (19 años);
- río Mijo en El Cacheo (vieja estación del INDRHI, código 493201), período 1983-1994 (12 años);
- río Los Baos en Vallejuelo (vieja estación del INDRHI, código 493802), período 1979-1994 (16 años);
- río Los Baos arriba de la confluencia con el río San Juan (código 493803), período 1979-1994 (16 años);
- río San Juan en Paso de Lima (vieja estación del INDRHI, código 493006), período 1983-1994 (12 años);
- río San Juan en Sabana Alta (estación del INDRHI, código 493007), período 1983-1994 (12 años);
- río Yaque del Sur en Villarpando (vieja estación del INDRHI, código 490002), período 1984-1994 (11 años);
- río Macasía en Ranchito (estación del INDRHI, código 543002), período 1973-1994 (22 años);
- río Macasía en Rinconcito (vieja estación del INDRHI, código 543004), período 1973-1994 (22 años).

Todos los cursos de agua de las cuencas de los ríos Yaque del Sur - San Juan y Macasía, cuyas escurrentías naturales han sido reconstruidas mediante el modelo matemático, excepto el río Mijo (San Juan) en El Cacheo y el río San Juan en Paso de Lima, resultan significativamente afectados por obras de toma para fines de riego que, juntamente a los dos embalses de Sabaneta (río San Juan) y de Sabana Yegua (río

Yaque del Sur) implican condiciones de escorrentía reales notablemente diferentes respecto de las condiciones naturales. Esta situación se deduce tanto del cotejo entre los hidrogramas y las curvas de duración medidas y calculadas (Anexo Memorias n° 15, Apéndice G), como de lo expuesto a este respecto en los Anexos Memorias n° 13 y 17.

Los resultados de la aplicación del modelo matemático están presentados de forma numérica y gráfica, para cada subcuenca anteriormente citada, en el Anexo Memorias n° 15, junto a los datos que caracterizan a la calibración.

Las características del régimen de la escorrentía natural reconstruida pueden así sintetizarse, con referencia a cada cuenca:

- río Yaque del Sur en El Puente (superficie = 1620.64 km<sup>2</sup>):

precipitación promedio = 1221 mm;

escorrentía total promedio = 434 mm (Q = 22.18 m<sup>3</sup>/s);

valores en promedio altos del coeficiente de escorrentía (cociente entre escorrentía y lluvia), caracterizados por una elevada variabilidad temporal (med = 0.35, máx = 0.47, mín = 0.19);

régimen hidrológico de tipo permanente (Q<sub>mín</sub> = 1.592-8.874 m<sup>3</sup>/s, Q<sub>300</sub> = 3.698-13.601 m<sup>3</sup>/s);

elevado valor porcentual del flujo base sobre la escorrentía total, en promedio del orden del 71% (máx = 79.7%, mín = 65.0%)

contenida variabilidad temporal de los caudales de estiaje (cv de alrededor de 0.39-0.44 con referencia a los caudales Q<sub>365</sub>-Q<sub>330</sub>);

Valores del caudal natural promedio anual de asignada probabilidad según el modelo logarítmico-normal (véase Anexo Memorias n° 13):

años secos:

período de retorno de 1 en 20 años: Q = 13.37 m<sup>3</sup>/s;

período de retorno de 1 en 10 años: Q = 14.82 m<sup>3</sup>/s;

período de retorno de 1 en 5 años: Q = 16.79 m<sup>3</sup>/s;

años húmedos:

período de retorno de 1 en 5 años: Q = 27.05 m<sup>3</sup>/s;

período de retorno de 1 en 10 años: Q = 30.64 m<sup>3</sup>/s;

período de retorno de 1 en 20 años: Q = 33.96 m<sup>3</sup>/s;

- río Mijo en El Cacheo (superficie = 161 km<sup>2</sup>):

precipitación promedio = 2014 mm;

escorrentía total promedio = 896 mm (Q = 4.56 m<sup>3</sup>/s);

valores en promedio elevados del coeficiente de escorrentía (cociente entre escorrentía y lluvia), caracterizados por una reducida variabilidad temporal (med=0.44, máx=0.52, mín=0.41);

régimen hidrológico de tipo permanente (Q<sub>mín</sub> = 0.516-1.125 m<sup>3</sup>/s, Q<sub>300</sub> = 0.658-1.687 m<sup>3</sup>/s);

contenido valor porcentual del flujo base sobre la escorrentía total, en promedio del orden del 48% (máx = 52.9%, mín = 40.9%)

modesta variabilidad temporal de los caudales de estiaje (cv de alrededor de 0.22-0.24 con referencia a los caudales Q<sub>365</sub>-Q<sub>330</sub>), consiguiente también a la reducida variabilidad temporal de las lluvias y de las escorrentías en la cuenca (cv lluvia=0.13,

cv escorrentía total=0.21);  
reducida permanencia en el cauce de valores de la escorrentía de interés para fines de utilización (en promedio 199 días por año están caracterizados por valores del caudal natural reconstruido inferiores a  $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , valor igual al caudal de operación del canal Mijo, cuya toma está aguas abajo de la sección considerada, véase Anexo Memorias n° 17).

Valores del caudal natural promedio anual de asignada probabilidad según el modelo logarítmico-normal (véase Anexo Memorias n° 13):

años secos:

período de retorno de 1 en 20 años:  $Q = 3.66 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

período de retorno de 1 en 10 años:  $Q = 3.79 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

período de retorno de 1 en 5 años:  $Q = 3.96 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

años húmedos:

período de retorno de 1 en 5 años:  $Q = 4.67 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

período de retorno de 1 en 10 años:  $Q = 4.87 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

período de retorno de 1 en 20 años:  $Q = 5.05 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

- río Los Baos en Vallejuelo (superficie =  $207 \text{ km}^2$ ):

precipitación promedio = 876 mm;

escorrentía total promedio = 213 mm ( $Q = 1.39 \text{ m}^3/\text{s}$ );

valores en promedio reducidos del coeficiente de escorrentía (cociente entre escorrentía y lluvia), pero caracterizados por una elevada variabilidad temporal (med = 0.25, máx = 0.45, mín = 0.18);

régimen hidrológico de tipo torrencial aunque permanente ( $Q_{\text{mín}} = 0.313\text{-}1.269 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{300} = 0.408\text{-}1.540 \text{ m}^3/\text{s}$ );

elevado aporte del flujo base a la escorrentía total, en promedio del orden del 81% (máx = 94.8%, mín = 73.2%);

contenida variabilidad temporal de los caudales de estiaje (cv = 0.37 con referencia a los caudales  $Q_{365}\text{-}Q_{330}$ ), consiguiente también al elevado aporte del flujo base;

escasa permanencia en el cauce de valores de la escorrentía de interés para fines de utilización (en promedio 304 días por año están caracterizados por valores del caudal natural reconstruido inferiores a  $1.8 \text{ m}^3/\text{s}$ , y 85 por valores inferiores a  $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ , valores respectivamente iguales al caudal de operación máximo y mínimo de los canales de riego presentes en la cuenca alrededor de la sección de control, véase Anexo Memorias n° 17).

Valores del caudal natural promedio anual de asignada probabilidad según el modelo logarítmico-normal (véase Anexo Memorias n° 13):

años secos:

período de retorno de 1 en 20 años:  $Q = 0.80 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

período de retorno de 1 en 10 años:  $Q = 0.89 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

período de retorno de 1 en 5 años:  $Q = 1.02 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

años húmedos:

período de retorno de 1 en 5 años:  $Q = 1.72 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

período de retorno de 1 en 10 años:  $Q = 1.98 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

período de retorno de 1 en 20 años:  $Q = 2.19 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

- río Los Baos arriba de la confluencia con el río San Juan (superficie =  $416 \text{ km}^2$ ):

precipitación promedio = 802 mm;

escorrentía total promedio = 163 mm ( $Q = 2.15 \text{ m}^3/\text{s}$ );  
valores en promedio reducidos del coeficiente de escorrentía (cociente entre escorrentía y lluvia), pero caracterizados por una elevada variabilidad temporal (med = 0.21, máx = 0.34, mín = 0.15);  
régimen hidrológico de tipo torrencial aunque permanente ( $Q_{\text{mín}} = 0.518\text{-}1.846 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{300} = 0.673\text{-}2.272 \text{ m}^3/\text{s}$ );  
elevado aporte del flujo base a la escorrentía total, en promedio del orden del 79% (máx = 93.7%, mín = 70.8%);  
contenida variabilidad temporal de los caudales de estiaje ( $cv = 0.36\text{-}0.37$  con referencia a los caudales  $Q_{365}\text{-}Q_{330}$ ), consiguiente también al elevado aporte del flujo base.

Valores del caudal natural promedio anual de asignada probabilidad según el modelo logarítmico-normal (véase Anexo Memorias n° 13):

años secos:

período de retorno de 1 en 20 años:	$Q = 1.17 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
período de retorno de 1 en 10 años:	$Q = 1.32 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
período de retorno de 1 en 5 años:	$Q = 1.53 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

años húmedos:

período de retorno de 1 en 5 años:	$Q = 2.70 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
período de retorno de 1 en 10 años:	$Q = 3.13 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
período de retorno de 1 en 20 años:	$Q = 3.54 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

- río San Juan en Paso de Lima (superficie =  $315 \text{ km}^2$ ):

precipitación promedio = 1942 mm;

escorrentía total promedio = 712 mm ( $Q = 7.12 \text{ m}^3/\text{s}$ );

valores en promedio elevados del coeficiente de escorrentía (cociente entre escorrentía y lluvia), pero caracterizados por una discreta variabilidad temporal (med 0.37, máx = 0.40, mín = 0.28);

régimen hidrológico de tipo permanente, la curva de duración presenta una doble concavidad ( $Q_{\text{mín}} = 1.330\text{-}2.630 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{300} = 1.733\text{-}3.263 \text{ m}^3/\text{s}$ );

significativo aporte del flujo base a la escorrentía total, en promedio del orden del 59% (máx = 61.7%, mín = 55.5%);

reducida variabilidad temporal de los caudales de estiaje ( $cv = 0.17\text{-}0.19$  con referencia a los caudales  $Q_{365}\text{-}Q_{330}$ ), consiguiente tanto al aporte del flujo base como a la reducida variabilidad temporal de las lluvias y de las escorrentías en la cuenca ( $cv \text{ lluvia} = 0.07$ ,  $cv \text{ escorrentía total} = 0.13$ );

buena permanencia en el cauce de valores de la escorrentía de interés para fines de utilización (en promedio 115 días por año están caracterizados por valores del caudal natural reconstruido inferiores a  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ , y sólo 20 por valores inferiores a  $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Valores del caudal natural promedio anual de asignada probabilidad según el modelo logarítmico-normal (véase Anexo Memorias n° 13):

años secos:

período de retorno de 1 en 20 años:	$Q = 6.58 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
período de retorno de 1 en 10 años:	$Q = 6.74 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
período de retorno de 1 en 5 años:	$Q = 6.93 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

años húmedos:

período de retorno de 1 en 5 años:	$Q = 7.73 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
período de retorno de 1 en 10 años:	$Q = 7.95 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
período de retorno de 1 en 20 años:	$Q = 8.13 \text{ m}^3/\text{s}$ ;



- río San Juan en Sabana Alta (superficie = 1900 km<sup>2</sup>):

precipitación promedio = 1246 mm;

escorrentía total promedio = 384 mm (Q = 22.59 m<sup>3</sup>/s);

régimen hidrológico de tipo permanente (Q<sub>mín</sub> = 3.036-9.177 m<sup>3</sup>/s, Q<sub>300</sub> = 4.339-13.610 m<sup>3</sup>/s);

significativo aporte del flujo base a la escorrentía total, en promedio del orden del 56% (máx=63.7%, mín=49.3%);

contenida variabilidad temporal de los caudales de estiaje (cv = 0.31-0.33 con referencia a los caudales Q<sub>365</sub>-Q<sub>330</sub>), consiguiente tanto a la entidad del aporte del flujo base, como a la modesta variabilidad temporal de las lluvias y de las escorrentías en la cuenca (cv lluvia=0.17, cv escorrentía total=0.22);

buena permanencia en el cauce de valores de la escorrentía de interés para fines de utilización (en promedio sólo 63 días por año están caracterizados por valores del caudal natural reconstruido inferiores a 8 m<sup>3</sup>/s, y apenas 7 por valores inferiores a 4.0 m<sup>3</sup>/s).

Valores del caudal natural promedio anual de asignada probabilidad según el modelo logarítmico-normal (véase Anexo Memorias n° 13):

años secos:

período de retorno de 1 en 20 años: Q = 15.36 m<sup>3</sup>/s;

período de retorno de 1 en 10 años: Q = 16.64 m<sup>3</sup>/s;

período de retorno de 1 en 5 años: Q = 18.33 m<sup>3</sup>/s;

años húmedos:

período de retorno de 1 en 5 años: Q = 26.53 m<sup>3</sup>/s;

período de retorno de 1 en 10 años: Q = 29.23 m<sup>3</sup>/s;

período de retorno de 1 en 20 años: Q = 31.66 m<sup>3</sup>/s;

- río Yaque del Sur en Villarpando (superficie = 3521 km<sup>2</sup>):

precipitación promedio = 1251 mm;

escorrentía total promedio = 422 mm (Q = 47.07 m<sup>3</sup>/s);

valores en promedio significativos del coeficiente de escorrentía (cociente entre escorrentía y lluvia), caracterizados por una discreta variabilidad temporal (med = 0.34, máx = 0.38, mín = 0.24);

régimen hidrológico de tipo permanente (Q<sub>mín</sub> = 5.468-16.806 m<sup>3</sup>/s, Q<sub>300</sub> = 10.267-23.963 m<sup>3</sup>/s);

significativo aporte del flujo base a la escorrentía total, en promedio del orden del 64% (máx = 72.8%, mín = 57.7%)

contenida variabilidad temporal de los caudales de estiaje (cv = 0.32-0.38 con referencia a los caudales Q<sub>365</sub>-Q<sub>330</sub>), consiguiente tanto a la entidad del aporte del flujo base, como a la modesta variabilidad temporal de las lluvias y de las escorrentías en la cuenca (cv lluvia=0.12, cv escorrentía total=0.20);

Valores del caudal natural promedio anual de asignada probabilidad según el modelo logarítmico-normal (véase Anexo Memorias n° 13):

años secos:

período de retorno de 1 en 20 años: Q = 33.92 m<sup>3</sup>/s;

período de retorno de 1 en 10 años: Q = 36.32 m<sup>3</sup>/s;

período de retorno de 1 en 5 años: Q = 39.46 m<sup>3</sup>/s;

años húmedos:

período de retorno de 1 en 5 años:	Q = 54.18 m <sup>3</sup> /s;
período de retorno de 1 en 10 años:	Q = 58.87 m <sup>3</sup> /s;
período de retorno de 1 en 20 años:	Q = 63.04 m <sup>3</sup> /s;

- río Macasía en Ranchito (superficie = 693 km<sup>2</sup>):

precipitación promedio = 1147 mm;

escorrentía total promedio = 319 mm (Q = 7.13 m<sup>3</sup>/s);

valores en promedio bajos del coeficiente de escorrentía (cociente entre escorrentía y lluvia), caracterizados también por una significativa variabilidad temporal (med = 0.27, máx = 0.40, mín = 0.20);

régimen hidrológico de tipo torrencial aunque permanente (Q<sub>mín</sub> = 0.259-1.448 m<sup>3</sup>/s, Q<sub>300</sub> = 0.606-2.353 m<sup>3</sup>/s);

contenido valor porcentual del flujo base sobre la escorrentía total, en promedio del orden del 43% (máx = 53.3%, mín = 33.9%)

contenida variabilidad temporal de los caudales de estiaje (cv de alrededor de 0.36-0.48 con referencia a los caudales Q<sub>365</sub>-Q<sub>330</sub>);

Valores del caudal natural promedio anual de asignada probabilidad según el modelo logarítmico-normal (véase Anexo Memorias n° 13):

años secos:

período de retorno de 1 en 20 años: Q = 4.15 m<sup>3</sup>/s;

período de retorno de 1 en 10 años: Q = 4.63 m<sup>3</sup>/s;

período de retorno de 1 en 5 años: Q = 5.29 m<sup>3</sup>/s;

años húmedos:

período de retorno de 1 en 5 años: Q = 8.78 m<sup>3</sup>/s;

período de retorno de 1 en 10 años: Q = 10.02 m<sup>3</sup>/s;

período de retorno de 1 en 20 años: Q = 11.18 m<sup>3</sup>/s;

- río Macasía en Rinconcito (superficie = 1494 km<sup>2</sup>):

precipitación promedio = 1288 mm;

escorrentía total promedio = 343 mm (Q = 16.29 m<sup>3</sup>/s);

valores en promedio bajos del coeficiente de escorrentía (cociente entre escorrentía y lluvia), caracterizados también por una discreta variabilidad temporal (med = 0.26, máx = 0.36, mín = 0.20);

régimen hidrológico de tipo torrencial aunque permanente (Q<sub>mín</sub> = 1.114-3.393 m<sup>3</sup>/s, Q<sub>300</sub> = 2.209-6.181 m<sup>3</sup>/s);

contenido valor porcentual del flujo base sobre la escorrentía total, en promedio del orden del 44% (máx=51.9%, mín=38.7%);

reducida variabilidad temporal de los caudales de estiaje (cv de alrededor de 0.26-0.33 con referencia a los caudales Q<sub>365</sub>-Q<sub>330</sub>);

en promedio 163 días por año están caracterizados por valores estimados del caudal natural en el cauce inferiores a los 8.0 m<sup>3</sup>/s, valor cotejable con el caudal de operación promedio total de los principales canales de riego presentes en la cuenca (véase Anexo Memorias n° 17).

Valores del caudal natural promedio anual de asignada probabilidad según el modelo logarítmico-normal (véase Anexo Memorias n° 13):

años secos:

---

período de retorno de 1 en 20 años:	$Q = 8.39 \text{ m}^3/\text{s};$
período de retorno de 1 en 10 años:	$Q = 9.49 \text{ m}^3/\text{s};$
período de retorno de 1 en 5 años:	$Q = 11.02 \text{ m}^3/\text{s};$
años húmedos:	
período de retorno de 1 en 5 años:	$Q = 19.47 \text{ m}^3/\text{s};$
período de retorno de 1 en 10 años:	$Q = 22.60 \text{ m}^3/\text{s};$
período de retorno de 1 en 20 años:	$Q = 25.55 \text{ m}^3/\text{s};$

## 7.3 Agronomía – Edafología

### 7.3.1 Campaña agronómica y edafológica

La valle de S. Juan de la Maguana está constituida en su mayor parte por extensas llanuras llamadas El Valle, formadas por materiales sedimentados en ambiente marino sobre un sustrato de roca dura: calizas eocénicas.

Una parte secundaria de la valle es aquella formada por pequeñas superficies regadías situadas entre las montañas, como en los valles cerca del pueblo de Banica.

Desde el punto de vista de las texturas, y de las velocidades de infiltración en la valle examinada prevalecen suelos de empaste intermedio y velocidad de infiltración intermedia.

La investigación edafológica ha permitido evaluar la existencia de áreas susceptibles al riego; éstas han sido subdivididas por clases de susceptibilidad, según criterios de carácter agronómico, así como está indicado en el pár. 6.9.2. L'indagine pedologica ha permesso di valutare l'esistenza di aree suscettibili per l'irrigazione; queste sono state suddivise per classi di suscettibilità, secondo criteri di carattere agronomico, così come indicato nel par.6.9.2.

De la evaluación de los datos elaborados y de la cartografía producida, se han identificado, en el interior del Valle de San Juan 16.175 ha susceptibles al riego, de éstas, 282 caen en la primera clase, 2214 en la segunda y 2549 en la tercera y 11.130 en la cuarta clase. Los suelos presentan generalmente baja permeabilidad y, a menudo, problemas de erosión laminar.

### 7.3.2 Identificación de zonas con regadío actual

Los cultivos que ocupan la mayor superficie son frijol y arroz, seguidos por batata, maíz, sorgo, yuca, guandul, cebolla, pastos y, en menor medida, por todas las demás especies enumeradas en la tabla siguiente.

La vegetación natural está constituida por formaciones dominadas por arbustos y plantas espinosas (Monte Espinoso Subtropical), y por bosque seco subtropical.

En general se encuentran tres tipos principales de uso agrícola de la tierra:

- frijol y otros cultivos menores;
- arroz y otros cultivos menores;
- pastos permanentes.

La superficie total agrícola del Valle de San Juan es igual a 81.473 ha; es oportuno reiterar que dicha superficie comprende superficies brutas, que comprenden taras como carreteras, caminos, canales, terrenos no cultivados. Además ha sido delimitada según el criterio de la predominancia, habiéndose realizado el levantamiento relevamiento en una escala de síntesis

En el interior de esta superficie, se han individualizado 45.578 ha con regadíos, tutti irrigati con acque superficiali. All'interno di questa superficie, sono stati individuati 44.607 ha irrigui, di cui 34.000 con acque superficiali, 4.777 con acque sotterranee e 5830 con acque miste, sotterranee e superficiali.

Por lo que concierne en fin a la demanda de agua de cada uno de los cultivos, la siguiente tabla contiene las necesidades netas anuales por unidad de superficie (1

hectárea). Para los datos de mayor detalle, se remite a las tablas adjuntas del Anexo 16. Per quanto riguarda infine la richiesta di acqua delle singole colture, la seguente tabella riporta i fabbisogni netti annuali per unità di superficie (1 ettaro). Per i dati di maggiore dettaglio, si rimanda alle tabelle allegate all'Annesso 16.

<b>Cultivos</b>	<b>DEM. NETA ANUAL(mm)</b>
maíz	496,41
arroz	876,06
pimiento	336,45
musáceas	1471,01
yuca	804,47
frijol	438,68
pastos	745,37
batata	950,06
guandul	573,62
papaya	1289,6
sorgo	427,24
maní	598,25
berenjena	438,68

## 8 CANTIDADES EXPLOTABLES DE AGUA

Con respecto a los recursos hídricos superficiales, con referencia a las dos cuencas que constituyen el Valle, los resultados del análisis desarrollado ponen en evidencia:

- en la cuenca del río Macasía, una utilización de las aguas subterráneas de hecho marginal, aun en la hipótesis de un eventual incremento de las actividades hidroexigentes, el modelo matemático ha puesto en evidencia cómo aun modestos incrementos de las tomas implicarían impactos considerables tanto sobre los niveles piezométricos como sobre el régimen de los caudales de estiaje del río Macasía. De acuerdo también con el cuadro hidrogeológico más bien desfavorable, no se vislumbran en este sector posibilidades concretas de un incremento generalizado de las tomas,  
en la cuenca del río San Juan, el modelo matemático ha puesto en evidencia impactos menores sobre el régimen hidrogeológico e hidrológico (caudales de estiaje) de ulteriores tomas de aguas subterráneas, sin embargo, en consideración también del papel preponderante de las aguas superficiales, aguas cuya ulterior utilización está vinculada de todas maneras en escala de cuenca del río Yaque del Sur, se aconseja destinar eventuales nuevas tomas sólo al uso hidropotable, en particular por los menores volúmenes en juego respecto de las utilizaciones agrícolas.  
Por lo que atañe a la parte meridional del sector del que se habla (al sur del río San Juan) las condiciones son en cambio generalmente muy críticas como pone en evidencia la cartografía hidrogeológica (Mapa n° 9 y Anexo Memorias n°18) y como confirman las aplicaciones de modelos matemáticos tanto respecto de las aguas subterráneas como superficiales.

Con respecto a los recursos hídricos superficiales y con referencia a las dos cuencas que constituyen el Valle, los resultados del análisis desarrollado ponen en evidencia:

- en la cuenca del río Macasía, el grado de explotación de las aguas superficiales, en particular para fines de riego, es bastante alto aunque es en conjunto inferior al de la cercana cuenca del río San Juan.  
En términos generales la reducción de la escorrentía es significativa, aproximadamente el 36% de la escorrentía promedio natural anual y al 62% de la escorrentía natural relativa a un año seco con período de retorno de 10 años, aun teniendo en cuenta la entrada a los cauces de parte de las aguas de exceso de riego.  
Ulteriores utilizaciones de los recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Macasía, al neto de específicos acuerdos con la República de Haití, podrían dar lugar por lo tanto a situaciones de desequilibrio en particular en años secos.  
Además tomas de aguas subterráneas, aun de entidad globalmente modesta, alrededor de los  $5-10 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ , pueden implicar significativas distorsiones del régimen de los caudales de estiaje con reducciones en porcentaje de la escorrentía en el cauce de hasta el 78% (para una toma de  $10 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$  en un año hidrológicamente seco,  $T=20$ ). Valores de las tomas de aguas subterráneas, del orden de los  $21-29 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$  en escala de cuenca, pueden implicar la anulación de las escorrentías de estiaje, pasaje de régimen permanente a esporádico, con referencia a la cuenca del río Macasía en Ranchito.
- en la cuenca del río San Juan, el grado de explotación de las aguas superficiales, en particular para fines de riego, es muy alto; en términos generales la reducción de la escorrentía puede estimarse en aproximadamente el 42% de la promedio natural, aun

teniendo en cuenta la entrada a los cauces de parte de las aguas de exceso de riego. Situación representativa de un nivel de utilización del recurso tendenciosamente crítica, aun manteniéndose la escorrentía natural total con valores mayores que las tomas brutas totales aun en años secos.

Sin embargo, resultando el entero sistema Yaque del Sur en condiciones de hecho críticas de utilización del recurso hídrico (véase cap. 5.1), posteriores utilizaciones de los recursos superficiales en la cuenca del río San Juan podrían dar lugar a situaciones de desequilibrio no tanto en la cuenca misma (sólo el río Los Baos está de hecho en condiciones de sobreexplotación), sino, sobre todo, aguas abajo en la cuenca del río Yaque del Sur, sector Los Guiros-Palo Alto, en particular en años hidrológicamente secos.

Tomas de aguas subterráneas, por ejemplo alrededor de los  $5-10 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a en escala de cuenca, no implican significativas distorsiones del régimen de los caudales de estiaje (reducción de la escorrentía en el cauce en Sabana Alta comprendida entre el 1.2% y el 10%, con referencia a años hidrológicamente secos y/o húmedos, T=20); sin embargo, tomas de aguas subterráneas del orden de los  $24 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a en escala de cuenca, implicarían la anulación de las escorrentías de estiaje, pasaje de régimen permanente a esporádico, con referencia a la sub-cuenca comprendida entre Sabana Alta y Paso de Lima (río San Juan), El Cacheo (río Mijo) y la confluencia del río Los Baos con consiguientes riesgos de comprometimiento ambiental.

## 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 9.1 Resumen de datos generales y socio-económicos

El área de estudio denominada "Valle de San Juan" (ver Fig. 1/1), está comprendida entre 18° 37' 22" y 19° 07' 30" de Latitud Norte y entre 71° 03' 07" y 71° 53' 19" de Longitud Oeste y tiene una superficie de aproximadamente 2,568 Km<sup>2</sup>.

Está dividida entre las provincias de: San Juan, Elías Piña y Azua y comprende en todo o en parte el territorio de 10 municipios.

La población de estos municipios que vive dentro del área de estudio se estima hoy a 305,940 habitantes de los cuales 157,560 (60%) viven en zonas rurales y 148,380 (40%) en áreas urbanas. De estos, el 51.5% son hombres y el 48.5% mujeres.

La tasa media de analfabetismo se calcula en un 35.8%. La población económicamente activa representa el 30.1 % de la población total. La mayoría son trabajadores asalariados (47.8%) y trabajadores por propia cuenta (34.8%).

Los sectores que más contribuyen a la economía y que son las mayores fuentes de empleo son, en orden de importancia la agricultura (58.74%), los servicios (13.81%) y el comercio (6.90%).

En el territorio incluido en el área del proyecto no hay actividades industriales relevantes, a parte algunas relacionadas con la industria alimentaria.

Las principales producciones agrícolas son arroz y habichuelas.  
Los productos ganaderos son representados esencialmente por vacunos.

No hay prácticamente desarrollo turístico.

A parte la extracción de material para la construcción (esencialmente concentrada en los ríos), las actividades en el área minera y extractiva, son muy reducidas. Se produce un poco de carbón en el sector Norte de la provincia de Elías Piña.

La red de carreteras, es de calidad media en el área y no está muy desarrollada. La única carretera en buen estado es la principal Azua - San Juan - Elías Piña.

En el área de estudio no se encuentran aeropuertos.

La distribución de electricidad es muy carente tanto en las áreas urbanas, como en las zonas rurales, donde el servicio no alcanza todos los pueblos.

El servicio telefónico no alcanza la calidad presente en otras partes del país. La cobertura celular es muy reducida.



## 9.2 Clima

Los datos climáticos del área hidrológica del interés (Valle de San Juan y cuenca alta del río Yaque del Sur) fueron tomados de las estaciones meteorológicas del INDRHI (21 estaciones pluviométricas/gráficas, período 1961-1996 y 10 estaciones climatológicas, período 1967-1996) y de la ONAMET (4 estaciones, período 1961-1990 y período 1939-1997).

La característica principal del clima en el área de estudio en el sector sur de la cuenca del río San Juan y alrededor de Las Matas de Farfán es la aridez, caracterizada por una evapotranspiración potencial de referencia ETPo (de Hergreaves-Samani) mayor que la precipitación en todos los meses del año, en cambio, las áreas húmedas se encuentran en las zonas intramontañas y de sierra, ocurriendo períodos húmedos hasta 4-7 meses.

El promedio de lluvia anual de la zona hidrogeológica del Valle es de 1077 mm (sector de San Juan: 967 mm; sector de Macasía-Tocino: 1174 mm), a nivel de estación los valores anuales medios oscilan entre 571 mm (Villarpando) y 2179 mm (Gajo de la Lagunita), en el sector occidental (cuencas del río San Juan y cuenca alta del río Yaque del Sur), y entre 879 mm (Pozo Hondo) y 2024 mm (Naranjito), en el sector oriental (cuencas de los ríos Macasía y Tocino);

La variación mensual de la precipitación presenta un régimen de tipo bimodal con época lluviosa en la primavera (en términos generales en el mes de mayo) y en verano-otoño (desde agosto hasta noviembre) y con sequía en el invierno y en julio. Pero si la marcha intranual está bastante homogénea en todo el territorio examinado, los meses máximos y mínimos relativos tienen una elevada variabilidad de un lugar al otro, y también entre estaciones bastante cercanas.

En el área hidrológica del Valle de San Juan el coeficiente de variación CV de la lluvia total anual asume, en sentido estadístico, el mismo valor en toda el área, es decir  $CV = 0.196$  (el más bajo de toda el área hidrológica del proyecto);

Se ha verificado, por las series históricas de la lluvia anual, como representativo a escala regional, el modelo logarítmico-normal por sus mejores resultados absolutos y relativos respecto a los modelos normal-Gauss y gamma-Pearson II, mientras que la ecuación de Hergreaves-Samani ha sido elegida como método de referencia para evaluar la evapotranspiración potencial ETPo.

La temperatura media del aire presenta valores anuales que fluctúan entre menos de 19 °C y más de 26 °C, sector de San Juan, y entre menos de 20 °C y más de 25 °C, sector de Macasía-Tocino. La variación intranual de la temperatura media oscila entre 3 y 4 °C, y, en todo el área de estudio, el período de mayores temperaturas corresponde a los meses de julio a agosto y lo de mínima a los meses de diciembre - febrero.

El promedio anual de la ETPo en la zona del Valle es de 1679 mm (sector de San Juan: 1656 mm; sector de Macasía-Tocino: 1701mm), a nivel de estación los valores anuales medios oscilan entre 1385 mm (Constanza) y más de 1800 mm (San Juan de la Maguana, Elías Piña, El Cercado y Las Matas de Farfán, mientras que los valores de la evaporación de tanque A medidos oscilan entre 1500 mm (Constanza) y 2450 mm (Matayaya).

Para mayores detalles, refiérase al Anexo Memorias n° 1.

### **9.3 Orografía, Hidrografía y Geomorfología**

La valle de San Juan es una cuenca de origen tectónico alargado según una dirección E-O.

Los elevados relieves que delimitan la ladera N de la cuenca (Cordillera Central), son extremadamente abruptos, con asperezas mayores en correspondencia de las vulcanitas cretáceas.

En la ladera meridional (Sierra de Neiba) el control estructural sobre la morfología de los relieves ha determinado la formación de valles principales y relieves en estrecha correspondencia con los ejes de anticlinal y sinclinal.

La franja situada a los pies de la Sierra de Neiba presenta un relieve de tipo de lomas bajas fuertemente controlado por la disposición estratigráfica de las formaciones.

La parte mediana de la cuenca está representada por un extenso valle axial con interpuestos amplios sectores de lomas, en correspondencia de los cuales se desarrolla a menudo un retículo isótropo de tipo dendrítico y densidad generalmente medio-alta.

El desarrollo de los valles aluviales se reduce consistentemente en el sector occidental del área de estudio, donde, procediendo hacia el río Artibonito, se observan extensiones siempre mayores de las áreas con lomas.

La parte central de la cuenca, entre el río San Juan y el río Yacahueque, está caracterizada morfológicamente por la presencia de estructuras lávicas tabulares delimitadas por escarpaduras subverticales.

La hidrografía del valle de San Juan individualiza claramente la separación entre una sub-área oriental y una occidental.

El sector oriental está caracterizado por el río San Juan y por una serie de afluentes perennes, como los ríos Jinova y Mijo.

El sector occidental está caracterizado por un sistema de drenaje que confluye en el río Macasía.

## 9.4 Geología y tectónica

### 9.4.1 Geología

Partiendo de los términos más antiguos, el cuadro litoestratigráfico de los terrenos que afloran en el área de estudio es el siguiente:

*Terrenos cretáceos y paleogénicos*, que constituyen los relieves que delimitan el valle de San Juan. En el sector septentrional afloran, en contacto tectónico, tanto las rocas pertenecientes a las formaciones predominantemente volcánicas de la Cordillera Central como los terrenos que pueden remontarse a las cuencas sedimentarias eocénicas. Parte de los relieves están constituidos también por rocas calcáreas eocénicas, que en la parte meridional, junto con las secuencias calcáreo marnosas de la formación Sombrerito, constituyen el esqueleto de la Sierra de Neiba.

Las unidades representadas en el área de estudio son el Complejo del Tiro (piroclastitas y vulcanitas de composición ácida e intermedia, con presencia subordinada de calizas y masas dacíticas y riodacíticas), el Grupo de Peralta (rocas flyshoides arenáceo-siltíticas y secuencias calcáreas predominantemente en facies detrítica) y la Formación de Neiba (calizas de color claro, de micríticas a cristalinas, con pedernales).

*Depósitos neogénicos*, continuos en todos sus términos solamente en el lado Sur, constituidos desde abajo por la Formación Sombrerito (representada aquí predominantemente por marnas a las cuales subordinadamente se intercalan, con frecuencia variable, estratos calcareníticos generalmente graduados), los terrenos de la unidad denominada Mioceno Conglomerático Indiferenciado (guijarros y cantos tanto calcáreos como arenáceos), la Formación Trinchera (mudstone, siltitas y areniscas, con conglomerados subordinados, en sucesión bien estratificada), la Formación Arroyo Blanco (siltitas con presencia de corales, con más arriba conglomerados y areniscas), y la Formación Arroyo Seco (guijarros, cantos en matriz fina, arenas, limos y arcillas, generalmente sueltos o con bajo grado de cementación)

*Melange tectónico*, constituido por litotipos de las formaciones premiocénicas con textura variable, presentando tanto facies cataclásticas como paquetes espesos de estratos de bajo grado caótico.

*Vulcanitas cuaternarias* de composición basáltica con trend de diferenciación hacia productos subsaturados.

*Depósitos Cuaternarios*, presentes en amplios afloramientos tanto en el valle como en las áreas a los pies de la montaña, de origen fluvial (aluviones recientes y terrazas) de granulometría variable desde las arenas limosas hasta los guijarros gruesos.

En el sector que se encuentra entre Elías Piña y La Estancia se encuentran también depósitos de tipo coluvial. En la parte meridional del área están presentes numerosos abanicos, tanto aluviales, como coalescentes y de bajo gradiente morfológico, como en fin los de deyección o mixtos, en parte desmantelados por la erosión, que caracterizan a la franja próxima a los relieves de la Sierra de Martín García.

En el área están presentes también otros depósitos detríticos de varia naturaleza.

### 9.4.2 Tectónica

Los terrenos neogénicos presentes en el valle poseen una colocación que define en

términos geométricos un sinclinal parcialmente perturbado por la presencia de estructuras plicativas menores (anticlinal de Elías Piña y sinclinal La Cañita) y de estructuras frágiles de dislocación.

La Sierra de Neiba que constituye el límite S de la cuenca está caracterizada por una serie de sinclinales y anticlinales (tectónica de tipo compresivo), a los cuales se asocian fallas posteriores de igual orientación que muestran un carácter de tipo distensivo (episodio confirmado por el vulcanismo cuaternario manifestado en la parte central del valle)

En el sector septentrional la fase compresiva se caracteriza, en cambio, por la formación de escamaduras sobrecorridas, delimitadas por fallas inversas de dirección NO-SE en la parte oriental.

Las únicas estructuras plicativas evidentes en la zona septentrional están limitadas a los terrenos carbonáticos y marnosos de las formaciones de Neiba y Sombrerito (anticlinal de Loma El Muñeco y pliegue-falla de la Loma del Guanito).

Los esfuerzos compresivos alcanzaron una intensidad decididamente elevada en la parte oriental donde se desarrolla una franja de intensa brecha tectónica.

## 9.5 Actividades preliminares, base de datos y SIG

La realización de esta etapa preliminar, ha permitido antes de todo la planificación correcta en todos sus detalles y luego la realización en forma optimizada de las actividades de proyecto.

La primera de las actividades preliminares, fue la recopilación de los antecedentes y la colección de todos los documentos cartográficos necesarios al desarrollo del estudio.

En esta fase se pudieron recoger y sintetizar 14 informes de interés a nivel nacional (entre los cuales el Informe final del Proyecto PLANIACAS) y 4 informes específicos sobre el área de estudio, además de adquirir los documentos cartográficos de base (2 mapas temáticos en escala 1:250000 el mapa topográfico nacional en escala 1:250000 y 15 hojas del mapa topográfico nacional en escala 1:250000 relativos al Valle de San Juan).

Paralelamente se llevó a cabo el diseño del banco de datos alfanumérico (realizado en ambiente Microsoft Access 97) y la implementación del Sistema de Información Geográfica - SIG (realizado en ambiente ArcView versión 3.0a) y al desarrollo de la integración entre los dos instrumentos de trabajo.

El banco de datos alfanumérico, contiene:

- las fichas de identificación de 1489 puntos de agua de los cuales 308 pertenecen al Valle de San Juan
- las fichas de identificación de 114 estaciones de aforos de las cuales 27 se encuentran en cuencas del Valle de San Juan
- las fichas de identificación de 28 estaciones meteorológicas instaladas en el curso del proyecto, de las cuales 5 están en relación con esta área de estudio
- los datos piezométricos, de calidad de las aguas (análisis y determinaciones de campo y análisis de rutina y especiales de laboratorio, incluyendo isótopos, metales etc.. cuando ejecutados), de control de la salinidad (perfiles en pozo).

En el SIG están incluidos todas las aplicaciones y los files que permiten tanto de visualizar los diferentes parámetros del banco de datos alfanumérico y de efectuar elaboraciones específicas relacionadas con estos datos (selecciones, operaciones matemáticas ...), como de realizar la cartografía temática de proyecto en las escalas deseadas.

Como última actividad preliminar se realizó la primera etapa del inventario de puntos de agua con el fin de poder escoger las redes de control piezométrico, de calidad y de salinidad previstas.

En esta fase se inventariaron en el Valle de San Juan 256 puntos. Entre estos, 48 resultaron aptos para ser incluidos en la red de control piezométrico, 111 resultaron aptos para la red de calidad y 99 no eran aptos, en las condiciones en las cuales se encontraron, para ser incluidos en redes de control.

Naturalmente las actividades de inventario continuaron también durante el desarrollo del proyecto, para permitir de incluir los nuevos puntos de agua realizados en el periodo del estudio y de añadir nuevos puntos en substitución de otros mientras tanto no más utilizables para las redes de control.

Al final del estudio las cantidades totales de puntos de agua inventariados es de 308, de

---

los cuales el 91.9% son pozos. De los pozos/sondeos, el 29.2% pertenecen a Salud Pública, el 15.6% a las comunidades, el 11.5% a INAPA y el 9.7% a particulares. Los pozos se utilizan principalmente a fines domésticos (64.3%). Los equipos de bombeo más utilizados son las bombas manuales (77.6%) y los molinos de viento (13.0%).

## 9.6 Actividades de campo y estudios

### 9.6.1 Monitoreo piezométrico y actividades relacionadas

Durante el proyecto se ejecutaron 17 campañas de medidas mensuales desde Septiembre 1997 hasta Octubre 1998 y luego desde Junio hasta Agosto 1999.

Vista la variabilidad y la inestabilidad previstas por el hecho de que la casi totalidad de los puntos existentes no eran dedicados para el control piezométrico, se tomaron en cuenta para el monitoreo todos los puntos (95 por un total de 864 medidas), donde se podía medir el nivel piezométrico para poder definir, al final de los dos años, todos los puntos potencialmente utilizables en una red de control que a la vez fueran aptos técnicamente y confiables en términos de continuidad de las medidas en el tiempo.

Como núcleo inicial se tomaron en cuenta los puntos incluidos en el banco de datos del INDRHI que ya tenían un mínimo de datos en tiempo pasado.

Los puntos que se pudieron medir siempre en las campañas de monitoreo fueron 42 o sea el 44.2% del total considerado

El mapa piezométrico se realizó utilizando las cotas determinadas con el método GPS diferencial en 50 puntos del Valle de San Juan y los datos piezométricos medios calculados a partir de los datos medidos en la red del proyecto a lo largo de las 13 campañas anteriores al huracán Georges (9/97 - 9/98).

Para el diseño final de la red de control piezométrico, se tomaron en cuenta los siguientes factores:

- Distribución en el espacio y densidad de los puntos
- Confiabilidad de los datos obtenidos
- Continuidad de toma de medidas en el tiempo
- Facilidad de acceso
- Optimización entre número de puntos técnicamente aptos y recursos humanos y materiales disponibles para los controles futuros.

Tomando en cuenta todo esto, el procedimiento adoptado para definir la red de control ha sido el siguiente:

- a) Selección de todos los puntos aptos (donde se pueden realizar medidas piezométricas confiables)
- b) Reconstrucción de las isopiezas
- c) Estudio/interpretación de las mismas
- d) Selección de los puntos donde se pudieron ejecutar medidas durante todos los meses de campañas piezométricas
- e) Selección de los puntos nuevos añadidos confiables
- f) Selección de los pozos nuevos realizados en el proyecto
- g) Reunión en un mapa de trabajo de los pozos de los puntos d), e) y f)
- h) Selección entre estos, de aquellos, que satisfacen los criterios indicados más arriba en este mismo párrafo y definición de la red de control

En algunos casos específicos, (pozos/sondeos utilizados también para el control de la salinidad o cerca de ríos para comprobar las relaciones entre estos y los acuíferos), donde entonces era importante una determinación más precisa de la elevación de algunos puntos, para la determinación de la cota se utilizó el levantamiento taquimétrico.

Esta metodología se aplicó en el Valle de San Juan en 3 puntos.

Los resultados se introdujeron en el banco de datos y se tomaron en cuenta para las actividades de conceptualización hidrogeológica y para la modelización.

### **9.6.2 Monitoreo de calidad**

La actividad de monitoreo se estructuró, como preveía el contrato, en base trimestral. El número elevado de muestras y la notable amplitud del área, respecto de la viabilidad disponible, a veces ocuparon un arco temporal un poco superior al mes previsto.

De las ocho campañas originalmente previstas por el contrato, se efectuaron 4. La reducción de la actividad de control fue necesaria como consecuencia del pasaje del huracán “George” en octubre de 1998, que habiendo afectado al área del proyecto, rindió impracticable tanto la viabilidad primaria como la menor.

En total se recolectaron 108 muestras de agua de la red de calidad.

### **9.6.3 Monitoreos especiales (isotopos, aguas minero-medicinales, potabilidad)**

En el curso del proyecto se han efectuado una campaña de monitoreo, por un total de seis muestras, con determinación de O18, D y T. Para dos de las seis muestras se ha determinado también el contenido C13 y C14.

La evaluación de las características de potabilidad de las aguas subterráneas ha sido realizada específicamente a través la toma y análisis de 1 agua, procedente de un pozo público, localizado en las áreas de estudio. Tale resultado fue integrado con la reinterpretación, a fines de la utilización potable, de los datos relativos a las aguas de 35 pozos pertenecientes a la Red de Calidad.

La muestra tomada expresamente para esta investigación ha sido sometida a la determinación de los parámetros químico-físicos y microbiológicos enumerados en el pár. 6.4.3. En el mismo párrafo están indicados los parámetros químico-físicos reelaborados para las muestras pertenecientes a la Red de Calidad.

La falta de manantiales con características minero-medicinales no ha permitido extender a esta área de estudio el estudio realizado.

### **9.6.4 Salinidad de las aguas subterráneas**

Vista la colocación interna, para esta área no se planteaban problemas ligados a la intrusión marina y por lo tanto no se ha llevado a cabo ninguna actividad específica en tal sentido.

### **9.6.5 Geofísica**

En esta zona, donde no se tenían datos, ni piezométricos ni estratigráficos, se utilizó la geofísica de forma muy fuerte para poder obtener informaciones sobre las características de permeabilidad de las diferentes formaciones presentes (aluviones y molasas sobretudo) y sobre la continuidad o no, a nivel regional, de horizontes arenoso-conglomeráticos presentes en las formaciones terrígenas continentales de edad



plio-pleistocénica.

En el presente estudio el método de prospección empleado fue el geoelectrico (de resistividad) en su modalidad Sondeos Electricos Verticales (S.E.V.) con configuración de tipo Schlumberger.

El trabajo se ejecutó en dos campañas, en las cuales se ejecutaron:

S.E.V. con AB = 150 m	2
S.E.V. con AB = 500 m	34
S.E.V. con AB = 1000 m	136
<b>Total S.E.V. realizados</b>	<b>172</b>

Las curvas de campo fueron interpretadas inicialmente mediante los abacos de Orellana-Mooney y luego con software dedicado a la computadora.

Los resultados se presentaron en forma de secciones geoelectricas.

### 9.6.6 Perforación y ensayos de bombeo

#### Perforación

Durante los estudios ejecutados se individualizaron los siguientes objetivos específicos para los sondeos a perforar en el Valle de San Juan:

- Mejorar el conocimiento geológico-estratigráfico de las áreas de estudio.
- Servir de calibración para la interpretación de la geofísica.
- Adquirir datos relativos a los parámetros hidráulicos de los acuíferos (T, K, S).
- Integrar la red de control piezométrico con pozos dedicados a este efecto.

En relación con estos objetivos específicos se realizaron:

Sondeos entubados a aprox. 7”	
- de profundidad inferior a 75 m	13
Sondeos entubados a aprox. 10”	1
- de profundidad inferior a 75 m	-
<b>Total</b>	<b>14</b>

De los 14 sondeos totales realizados, se ejecutaron:

- 8 sondeos con rotación directa y circulación de aire o espuma;
- 1 sondeo con rotación directa y circulación de lodo (polímero);
- 5 sondeos con método de percusión.

#### Ensayos de bombeo

En 6 pozos a bombear se han instalado electrobombas sumergidas; el caudal de bombeo se ha elegido de acuerdo con los observados durante la perforación.

Los niveles durante el ensayo (sea en los pozos sea en los piezómetros de observación), han sido medidos a través de sondas electricas con cable plano.

Para la medida y el ajuste del caudal de bombeo, se han utilizado recipientes de

capacidad conocidas y cronómetros de precisión para la medida del tiempo de llenado y cuando ha estado posible, se han empleado contadores totalizadores.

La medición de los niveles han estado efectuadas a intervalos regulares, así que estas han podido quedar regularmente distribuidas en una escala logarítmica.

Se han tomado todos los cuidados necesarios para que el agua extraída no volviese al acuífero.

Al paro de la bomba, después de 72 horas de ensayo, se han medido los niveles en subida, al fin de calcular el parámetro de transmisividad también con los métodos de recuperación.

### **9.6.7 Integración de la red meteorológica existente**

A fin de suplir la información de la red meteorológica existente del INDRHI y de la ONAMET, se instalaron 3 estaciones meteorológicas de tipo automático con alimentación por panel solar y con archivo en disco magnético de los valores medidos, es decir: precipitación, temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, dirección y velocidad del viento, evaporación (tanque tipo A).

La instalación de las estaciones meteorológicas fue efectuada en dos distintos momentos: en el mes de septiembre del año 1997 se instaló la estación meteorológica de Sabaneta (sector de San Juan), en el mes de agosto del año 1999, consiguientemente a una variante de proyecto, se instalaron las estaciones de Higuero (Banica - Las Matas de Farfán) y El Pinar (El Cercado) en el sector de Macasía, para garantizar tanto un mejor control de áreas afectadas por particulares condiciones climáticas, como la disponibilidad, en el futuro, de datos climáticos fiables y representativos a favor de la utilización del modelo matemático lluvia-escorrentía calibrado en el ámbito del proyecto (véase Anexo Memorias n° 15).

La identificación de los sitios idóneos para la instalación de las estaciones meteorológicas ha sido desarrollada en dos fases: selección preliminar, en la oficina, de la distribución óptima de los sitios en los cuales ubicar las estaciones meteorológicas, y comprobación en el campo, de la posibilidad de efectuar la instalación.

Para mayores detalles, refiérase al cap. 6.7 y al Anexo Memorias n° 2, donde en particular se presentan: la ubicación de las estaciones instaladas, los valores diarios y mensuales de los parámetros climáticos medidos junto al análisis tanto de las características climáticas, como de la marcha de la precipitación y de la velocidad del viento asociadas al paso del huracán George en el mes de septiembre 1998.

### **9.6.8 Campañas de aforos directos e instalación regletas hidrométricas**

A fin de integrar y completar la información de la red hidrométrica del INDRHI se han efectuado dos campañas de aforos (septiembre 1997 - septiembre 1998, junio 1999 - agosto 1999) en diferentes secciones de los ríos que se encuentran en la zona de estudio, red de aforos del estudio.

El diseño de la red de la primera campaña de aforos, la cual ha incluido también estaciones hidrométricas vigentes y/o suspendidas del INDRHI para alcanzar una distribución espacial óptima, ha sido desarrollado según criterios hidrogeológicos, hidrológicos, hidrográficos y económicos. En fin, se han identificado 23 lugares idóneos para efectuar medidas mensuales de caudal.

En el período junio-agosto 1999 se ha efectuado una segunda campaña de aforos en las zonas hidrológico-hidrogeológicas de interés cuyo diseño ha sido desarrollado, a la luz tanto de los resultados de la primera campaña como de las modificaciones hidro-morfológicas consiguientes al paso del huracán George (sept. 98), según los siguientes criterios: representatividad hidrológica hacia el régimen hidrológico y el intercambio napa-río, mejor control de los principales canales de riego y disponer de una red de referencia eficiente y eficaz como sostén para la individuación de la red hidrométrica básica de control.

Sobre la base de lo descrito anteriormente, se han considerado en total 22 secciones de aforos.

Para mayores detalles, refiérase al cap. 6.8.1, al Anexo Memorias n° 1 y al Mapa n° 2 (Red de control hidrogeológico e hidrométrico).

Con el paso del huracán George en Septiembre de 1998, la red INDRHI de control hidrométrico mediante regletas (miras) sufrió daños muy graves, tanto por la destrucción de las infraestructuras que las sustentaban, como por la desviación del curso de muchos ríos.

Con estos acontecimientos, se presentó entonces, como prioridad absoluta, la reconstrucción de la red ya existente, con el fin de dar continuidad a las series históricas de medidas.

Fue así que de las 90 regletas disponibles, 12 se instalaron en el Valle de San Juan, distribuidas en 6 estaciones, todas pertenecientes a la vieja red de control del INDRHI.

### 9.6.9 Actividades agronómicas y edafológicas

El **levantamiento** edafológico ha sido programado sobre la base de un plan que ha permitido una organización racional de **las actividades de campo**, junto con una homogénea distribución territorial de **las mismas**.

Se ha adoptado un tipo de **levantamiento** denominado “razonado”, es decir que ha tenido en cuenta las características territoriales capaces de influir sobre la génesis de los suelos.

La campaña de **levantamiento** edafológico ha consistido en:

#### Ejecución de 2 perfiles

Para cada perfil se han tomado en promedio tres muestras, sobre las cuales se han efectuado análisis físico-químicos específicos, útiles para la definición de la susceptibilidad al riego.

**Ejecución de 20 barrenados** para una correcta determinación de la textura de los suelos y para definir mejor los límites de las unidades cartográficas.

Durante la campaña se han cumplido además observaciones puntuales de los suelos, que han constituido una ulterior ayuda para la definición de las áreas susceptibles al riego;

**Ejecución de 9 ensayos infiltrométricos**, localizados en proximidad de perfiles representativos de cada una de las series de suelo.

Para la determinación de la susceptibilidad de los terrenos al riego, se han utilizado los datos procedentes del **levantamiento** edafológico; la susceptibilidad se ha visto en efecto como la propensión de un terreno a hospedar cultivos regadíos, considerando la existencia de eventuales limitaciones derivantes de factores físicos y edafológicos, sin tomar en consideración la eventual disponibilidad hídrica o factores de tipo socioeconómico.

Los factores físicos considerados han sido esencialmente la topografía y el drenaje.

Los factores edafológicos tomados en consideración han sido esencialmente la profundidad efectiva, la textura, la estructura, la consistencia, el color, la permeabilidad, la tasa de infiltración.

El estudio realizado ha permitido la producción de un mapa de las áreas irrigadas y de la susceptibilidad a la irrigación, que contiene las siguientes informaciones:

- áreas agrícolas no regadías
- áreas agrícolas regadas con aguas subterráneas
- áreas agrícolas regadas con aguas superficiales
- áreas agrícolas regadas con aguas mixtas
- áreas regadas ocasionalmente con aguas superficiales
- principales cultivos efectuados
- susceptibilidad a la irrigación de las áreas actualmente no regadías.
- localización de los perfiles edafológicos realizados

Para su realización, se han llevado a cabo las siguientes fases de trabajo:  
delimitación de las áreas de estudio sobre la base topográfica;  
fotointerpretación de fotos aéreas en escala promedio 1:40.000 en blanco y negro, derivadas de vuelos efectuados en los años 1983/1984;  
verificación, actualización y terminación de la fotointerpretación a través de investigaciones e inspecciones de campo;  
digitalización de las informaciones cartográficas;  
construcción del mapa y de la leyenda en ambiente GIS.

En fase de elaboración, se ha procedido además a la subdivisión del territorio de estudio en clases texturales homogéneas, a fin de suministrar un valor a utilizar como input para la determinación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos.

En el presente estudio se definen además los volúmenes de agua de riego necesarios para los cultivos en el distrito de riego. Los volúmenes de agua han sido determinados mediante la realización de un balance hídrico agronómico en relación con los cultivos presentes.

Para la determinación de dicho balance hídrico se ha adoptado un modelo agronómico, que ha requerido informaciones sobre los suelos, clima y sobre los cultivos en cuestión.

El balance hídrico permite determinar los probables volúmenes de agua que pueden ser utilizados por los cultivos, mediante la evaluación de la dinámica hídrica total en el sistema suelo-planta-atmósfera en ciertas condiciones agroecológicas dadas.

Para el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos, se ha tratado de suministrar contemporáneamente el dato final (en la forma más agregada posible) y todos los datos de partida, con la posibilidad de formular hipótesis variando los datos de partida, para obtener inmediatamente una respuesta, con la consiguiente variación del dato final. Para satisfacer estas exigencias se ha realizado una hoja electrónica, que se ha mantenido lo más uniforme posible para todas las estaciones meteorológicas consideradas.

### **9.6.10 Evaluación de la utilización del agua - Balance hídrico**

La evaluación de los balances hídricos se ha basado en la interpretación, en escala de zona hidrológico-hidrogeológica y de sub-áreas internas a ellas, del estado que deriva de hecho del balance entre disponibilidades naturales y modalidad y entidad actuales de las utilizaciones, identificando las problemáticas existentes y/o posibles consiguientes a condiciones críticas y de competencia-insatisfacción entre los distintos usos.

Por lo que atañe al sector superficial, se ha procedido al análisis integrado de los resultados de los estudios hidrológico, agronómico y modelístico, prestando particular atención en la evaluación de las utilizaciones (tomas). La evaluación del balance hídrico entre oferta natural de los sistemas hidrológicos y actual nivel de las tomas de nuestro recurso hídrico ha sido referida a condiciones hidrológicas promedio y de sequía, con tiempo de retorno de 10 años, siendo estas últimas representativas de las situaciones de mayor criticidad en términos de recurso aprovechable. Con respecto al impacto de las actuales utilizaciones sobre la escorrentía mínima residual en el cauce, se han suministrado indicaciones tanto sobre el posible valor mínimo del caudal ecológico, sobre la base sólo de consideraciones de tipo hidrológico como, donde la información disponible era suficiente, sobre el nivel actual de posible criticidad ambiental a través del cotejo entre valores medidos del caudal mínimo en el cauce y valores de posible referencia del caudal ecológico.

También por lo que atañe al sector subterráneo, se ha procedido al análisis integrado de los resultados de los estudios hidrológico, agronómico y modelístico. En particular se ha procedido a un nuevo examen de los valores de recarga, con referencia tanto a las condiciones de un año promedio como a las de un año seco, con tiempo de retorno de 10 años, siendo estas últimas representativas de las situaciones más críticas en términos de recurso aprovechable. El papel de los cursos de agua (p. ej. alimentación o drenajes) y la entidad de los intercambios con el mundo subterráneo, la evaluación de los flujos a lo largo del área costera) y la evaluación de las explotaciones han completado el cuadro de referencia.

La evaluación de las explotaciones ha sido objeto de un análisis más pormenorizado. Los datos demográficos elaborados por la Oficina Nacional de Estadística, han permitido una evaluación indirecta de los consumos potables. Las informaciones disponibles por lo que se refiere al sector turístico (número de presencias diarias, existencia de infraestructuras, etc....) han sido evaluadas a la luz de los consumos individuales generalmente muy elevados y del impacto de todas maneras elevado en términos de demanda hídrica. Por lo que concierne a los consumos para fines agrícolas, se han considerado críticamente los resultados del estudio agronómico, con particular referencia a los cultivos practicados, a las exigencias hídricas netas y brutas (con hipótesis de eficiencia total generalmente de alrededor del 30%), a la extensión areal de los cultivos.

Se ha concluido el estudio con un examen crítico del balance hídrico, con particular atención en poner en evidencia las condiciones críticas en términos cuantitativos (aprovechamiento elevado respecto de la recarga total) y la división, donde era necesario, en sub-áreas de distinta criticidad. Aunque no concerniese estrictamente al tema del balance hídrico, se han relevado también aquellas situaciones críticas desde el punto de vista cualitativo, con particular referencia a las áreas costeras y a los fenómenos de intrusión salina en acto.

### 9.6.11 Cartografía temática

En el curso del proyecto ha sido preparada tanto una cartografía hidrogeológica en escala 1:50.000 (Mapa 9/4 para la Valle de San Juan) como una cartografía de vulnerabilidad en escala 1:100.000 (Mapa 10/4 para la Valle de San Juan).

Para la producción de la cartografía hidrogeológica, se ha procedido al examen de la bibliografía y de la cartografía existente, para realizar luego una verificación sistemática de la geología mediante inspecciones preliminares, fotointerpretación a partir de fotos aéreas y controles de terreno.

Una vez definido el cuadro geológico de mayor fiabilidad, contextualmente a las informaciones hidrogeológicas adquiridas en el curso del trabajo de campo, se ha procedido a la sucesiva caracterización hidrogeológica, utilizando como criterios de referencia lo de la Leyenda UNESCO del año 1970, que pero han sido seguidos en líneas generales; dal momento che la complejidad y la articulación de las características sobre todo del medio poroso y de los acuíferos del sistema arrecifal, han sugerido la oportunidad de una articulación de la clasificación mucho más compleja, que ha subdividido el territorio sobre la base de las siguientes clases hidrogeológicas.

- Formaciones porosas: acuíferos de permeabilidad muy alta y muy productivos.
- Formaciones porosas: acuíferos de permeabilidad variable y productividad media.
- Formaciones porosas: acuíferos de permeabilidad variable, pero normalmente poco productivos.
- Formaciones fisuradas: acuíferos extensos y productivos (permeabilidad a menudo alta).
- Formaciones fisuradas: acuíferos locales o discontinuos (permeabilidad moderada o variable).
- Acuíferos en caliza arrecifal organógena de permeabilidad elevada de origen primario y/o secundario.
- Acuíferos en caliza arrecifal con litofacies detrítica de permeabilidad de variable a buena, esencialmente de origen primario.
- Acuíferos en sucesiones terrígeno-carbonáticas, donde el componente terrígeno es predominante. Permeabilidad localmente buena.
- Formaciones no acuíferas o con acuíferos muy locales.

La representación cartográfica del territorio subdividido sobre la base de las clases enumeradas arriba ha sido completada con piezometrías, elementos geológico-hidrogeológicos, elementos hidroquímicos y elementos hidrográficos.

Los mapas de vulnerabilidad realizados son mapas de vulnerabilidad integrada que consisten en la representación cartográfica conjunta de los centros de peligro potencial y de la vulnerabilidad intrínseca.

Tales mapas han sido producidos adoptando el método de evaluación paramétrica DRASTIC, que permite, mediante índices numéricos, una evaluación estandarizada de la susceptibilidad a la contaminación de las aguas subterráneas (vulnerabilidad intrínseca) para cargas generales de agentes contaminadores localizables en la superficie.

Este método los siete parámetros principales en el control del movimiento de las aguas en los terrenos naturales. Éstos son: *Profundidad al acuífero; Recarga neta; Tipo de acuífero; Tipo de suelo; Pendiente; Impacto del tipo de zona vadosa; Conductividad hidráulica.*



A cada uno de estos factores, relativamente a las clases de variación consideradas, se le atribuye un puntaje (rating) a multiplicar sucesivamente por un peso (weight) atribuido por convención al factor mismo. De la sumatoria de los productos de los factores considerados se obtiene índice numérico (Índice DRASTIC) que expresa la vulnerabilidad potencial del acuífero que se encuentra por debajo del punto considerado.

Sobre la base del campo de variación arriba citado se definieron de esta manera las siguientes clases de vulnerabilidad:

<i>Vulnerabilidad</i>	<i>Índice Drastic</i>
muy baja	23 - 64
baja	65 - 104
intermedia	105 - 145
alta	146 - 185
muy alta	186 - 221

La parcial indisponibilidad de los datos relativos a algunos factores limitó la evaluación de vulnerabilidad a áreas reducidas respecto de la extensión de la zona de estudio.

#### **9.6.12 Modelización aguas subterráneas**

Se realizó un modelo matemático bidimensional de flujo, mediante el código de cálculo de diferencias finitas Modflow, como cobertura del valle en su totalidad, y por lo tanto de los 2 principales sectores de San Juan, al E, y de Las Matas de Farfán, al O, separados por un alto estructural de rumbo N-S bien evidente en la cartografía hidrogeológica.

El modelo fue calibrado en condiciones estacionarias, teniendo como referencia la piezometría promedio del período 9/97 – 9/98.

Una sucesiva actividad de modelización se refirió a la extensión del modelo a condiciones transitorias en un período de 30 años de duración. No se trató sin embargo de una calibración propiamente dicha, dado el número exiguo de informaciones acerca de los coeficientes de almacenamiento y sobre todo la falta total de datos históricos de toma. por lo que atañe a las piezometrías históricas existen en cambio algunos datos que confirman la gradual represurización en el curso de los últimos años, pero de todas maneras no son suficientes para los fines de la modelización en transitorio.

### 9.6.13 Modelización aguas superficiales

El trabajo de análisis y modelización matemática de las aguas superficiales, desarrollado con referencia a las cuencas de los ríos San Juan (Yaque del Sur) y Macasía, trabajo que integra y completa el análisis hidrológico desarrollado en el Anexo Memorias n° 13 (Caracterización hidrológica de la zona de estudio, área del Caribe, R.D.), consistió en la reconstrucción, mediante el modelo matemático lluvia-escorrentía, de las series históricas de los caudales naturales en secciones de interés de las cuencas arriba mencionadas a fin de suministrar los elementos necesarios para dar apoyo a una gestión sustentable de los recursos hídricos (véanse cap. 8 y Anexos Memorias n° 17 y 20).

La reconstrucción de la serie histórica de la escorrentía natural ha sido efectuada en base temporal diaria mediante la aplicación de un modelo matemático lluvia-escorrentía (código MIKE-ZERO vers. 4.10, módulo lluvia-escorrentía, del Danish Hydraulic Institute, DHI) de tipo conceptual determinístico cuyos parámetros característicos han sido evaluados en función de la variabilidad espacio-temporal de los factores meteo-climáticos e hidro-geomorfológicos que afectan al ciclo natural del agua.

La actividad de calibración del modelo matemático se ha desarrollado según el siguiente recorrido metodológico: individualización de las secciones fluviales de referencia respecto de las cuales efectuar la reconstrucción de las series históricas de las escorrentías, individuación de las estaciones pluviométricas de referencia; estimación de la evapotranspiración potencial de referencia por medio de la ecuación de Hergreaves-Samani, análisis de los datos de caudal medidos (hidrogramas) en las secciones de control para la calibración del modelo matemático, selección de los valores de entrada de los parámetros del código de cálculo para la calibración del modelo.

La calibración del modelo ha sido considerada como satisfactoria cuando resultaban satisfechos criterios de control esencialmente basados en el cotejo gráfico entre la marcha de los valores de caudal medidos y calculados con referencia, para cada año objeto de calibración, al hidrograma anual y a la curva de duración.

Los criterios de control, en condiciones de escorrentía medida natural y/o distorsionada por el uso, así como las modalidades de selección, están detalladamente ilustrados en el Anexo Memorias n° 15.

Para mayores detalles, refiérase al cap. 6.8.4 y al Anexo Memorias n° 15.

## 9.7 Resultados obtenidos

### 9.7.1 Caracterización hidrogeológicas de las diferentes formaciones geológicas y acuíferos presentes

Las formaciones geológicas presentes en el área de estudio han sido caracterizadas desde un punto de vista hidrogeológico utilizando como base de clasificación las especificaciones de la leyenda UNESCO.(1970). Esta base ha sido necesariamente adaptada, articulándola ulteriormente, a fin de adecuarla aún más a las características de los sistemas estudiados.

Las tipologías hidrogeológicas identificadas para las formaciones en el área de estudio han sido:

- *Formaciones porosas, sede de acuíferos de permeabilidad alta y muy productivo:* Aluviones recientes y gruesos asociados con el río San Juan y con sus afluentes más importantes, como los ríos Jinova, Mijo, y con el río Yaque del Sur .
- *Formaciones porosas, sede de acuíferos de permeabilidad variable y productividad media:* La mayoría de las formaciones aluviales de la llanuras de los ríos San Juan, Macasía, Yabonico, Yacahueque, comprendiendo la franja de conoides de bajo gradiente presentes en el sector central.
- *Formaciones porosas, sede de acuíferos locales y discontinuos, de permeabilidad moderada o baja, poco productivos:* Depósitos sedimentarios paleogenicos apenas litificados (Formaciones Arroyo Blanco y Arroyo Seco); Depósitos terrígenos cuaternarios s.l., finos y escasamente alimentados, de la franja de pie de monte meridional.
- *Formaciones fisuradas, sede de acuíferos productivos, de permeabilidad a menudo alta:* Calizas ,fracturadas y en algunos lugares karstificadas, de la Formación de Neiba (teo-tmi'c) y las análogas formaciones calcáreas (teo-tol'c), que se encuentran en los relieves al N del valle.
- *Formaciones fisuradas, sede de acuíferos locales o discontinuos, de permeabilidad medio-baja:* Basaltos le las mesetas central; Conglomerados bien litificados (tmi'cg); Rocas magmáticas y vulcano-sedimentarias (k'mgm).
- *Formaciones de baja permeabilidad y sin acuíferos significativos:* Formaciones con predominantes intercalaciones margosas o prevalentemente fini (Formaciones Sombrerito y Trinchera); Formaciones flyshoides terciarias, con areniscas y margas (ks-tol'FI), Melange tectónico ('mel).

La determinación a través de los ensayos de bombeo de algunos parámetros hidrogeológicos (tab.6.6.2/1) de las principales formaciones acuíferas aluviales ha evidenciado cómo los valores de T oscilan entre máximos de  $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  y mínimos por debajo de  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  o sea con variaciones de 4 ordenes de magnitud.

Los valores mayores se encuentran en todo el sector E de la llanura de San Juan

En la parte O del valle los valores de T son generalmente mucho más bajos, en acuerdo también con las indicaciones de la cartografía hidrogeológica.

### 9.7.2 Pozos, sondeos y manantiales

En el sector oriental del valle los pozos se concentran en la llanura de San Juan, al N de la gran estructura tectónica que limita a S la marcha del curso del río San Juan. Son

pozos perforados en capa acuífera libre o semiconfinada.

Al S de la citada estructura tectónica, donde las condiciones se modifican radicalmente se encuentran sólo pocos pozos y de pequeña importancia.

La situación en el sector O del valle es diferente; los pozos están concentrados en general en los acuíferos aluviales no confinados.

En el curso del proyecto no se han individualizado manantiales relevantes en el área de estudio. Se indican de todas maneras en correspondencia de los relieves septentrionales algunos manantiales que alimentan directamente la red hidrológica local.

### 9.7.3 Piezometría

#### **Piezometría y variaciones piezométricas en el tiempo**

Considerando que el valle se caracteriza por la presencia de 2 sub-áreas hidrogeológicas bien distinguidas, también sus piezometrías están analizadas separadamente.

##### – Sector Este del valle (al Este de Pedro Corto)

Este sector está caracterizado por niveles piezométricos generalmente próximos a la superficie topográfica en el centro del valle, con piezometría estrictamente relacionada con los niveles de los ríos y gradientes generalmente pequeños (orden de 5 por mil).

El gradiente aumenta en los bordes por efecto de la recarga de las formaciones que constituyen las áreas de montaña, y se observan direcciones de flujo generalizadas en dirección del eje del valle.

Bien distinta es la situación del área al S del gran alineamiento tectónico que se extiende por toda el área de estudio, limitando al S el curso del río San Juan, caracterizada por condiciones generalizadas de sequía. Pocos son los pozos y, por lo tanto, los datos piezométricos, así que no se puede diseñar una piezometría. Se pueden de toda forma suponer gradientes en dirección N-E, aunque se esté en presencia de acuíferos discontinuos y localmente confinados.

El divisorio principal de las aguas subterráneas que limita al O la sub-área examinada se encuentra cerca de los pueblos de Las Charcas de María Nova y de Pedro Corto y se extiende en dirección N, cruzando las lomas de rocas basálticas (q'b). Otro divisorio se encuentra en el límite oriental del área de estudio entre los valles del Río Mijo y del Río Yaque del Sur. Otros divisorios existen en el sector S, ya fuera del área estudiada..

##### – Sector Oeste del valle (al Oeste de Las Charcas de María Nova y Pedro Corto)

En este sector se evidencia el papel drenante del río Macasia con líneas de flujo que, de forma parecida a lo que pasa en el sector precedente, se extienden desde el N (Cordillera Central) y desde el S (Sierra de Neiba), para modificarse hacia el O-NO, según el curso del río Macasia. Los gradientes también permanecen del orden del 5 por mil.

A parte del divisorio principal de las aguas subterráneas entre las 2 sub-áreas, otro divisorio se encuentra, en el sector N del valle con dirección E-O en correspondencia de la separación entre el valle principal (del río Macasia) y el valle que se encuentra en el margen S de la Cordillera Central (alineamiento Sabana Cruz-Los Memisos).

Las calizas (toe-tmi'c) al S, como las lomas de rocas basálticas en la extremidad oriental, y las formaciones que pertenecen a la Cordillera Central al N, constituyen, a nivel regional, las áreas de alimentación del sistema hídrico subterráneo.

Por lo que se refiere al análisis de las variaciones piezométricas en el tiempo, los mínimos se observan esencialmente en los meses de Mayo y de Febrero: los máximos,

por otro lado, tienen mayor frecuencia en Noviembre y se sitúan esencialmente entre Octubre y Enero.

Las variaciones anuales son generalmente muy reducidas (en mayoría inferiores a 1 m): las máximas observadas no superan los 2.5.

Por lo que atañe a las variaciones de los niveles medios después del 1970, no se tienen datos para poner en evidencia la evolución de los mismos.

#### **Proposición de una red de control piezométrico**

La red de control propuesta cuenta con 22 puntos, de los cuales 12 (55%) dedicados solamente a la red y 10 (45%) privados. Los puntos de la red sin bomba son 20 (91%) y con bomba instalada son 2 (9%).

La repartición en el espacio de los puntos propuestos está en acuerdo con los criterios generales arriba indicados en este mismo informe y se concentran principalmente en las aluviones del fondo de los valles

#### **9.7.4 Calidad de las aguas subterráneas y caracterización hidroquímica**

La peculiaridad de la zona está dada por la presencia masiva de aguas de tipo bicarbonato-alcalino, mientras que el tipo hidroquímico de todas maneras más difundido es el típico, o sea el tipo bicarbonato-alcalino-térreo.

Las aguas clorurado-alcálicas están representadas por sólo tres muestras, todas ubicadas alrededor del centro poblado de S. Juan.

Toda la zona de estudio no muestra particulares sufrimientos, por lo menos en la parte axial del valle, por lo que se refiere al hallazgo de aguas subterráneas con adecuadas características de potabilidad.

En general se observa en el sector occidental que los puntos hídricos con decaimiento de la potabilidad de las aguas son más bien discontinuos y atribuibles generalmente a la intermitente superación de los límites de potabilidad relativos al Residuo Fijo y a los Nitritos/Nitratos. El Residuo Fijo resulta ser el parámetro de criticidad mayormente recurrente en éste sector.

Relativamente al sector oriental al O de San Juan, la única área de mayor comprometimiento es en las cercanías de la aldea de Arroyo Loro, por causa de contenidos excesivos de Residuo Fijo y Magnesio.

#### **9.7.5 Salinidad de las aguas subterráneas**

Vista la colocación interna, para esta área no se planteaban problemas ligados a la intrusión marina y por lo tanto no se ha llevado a cabo ninguna actividad específica en tal sentido.

#### **9.7.6 Resultados análisis isotópicos, edad de las aguas y zonas de recarga**

No habiendo evidentes vínculos entre composición y ubicación de los puntos de toma, las causas de la variabilidad de la composición parecerían ser debidas a la presencia de áreas de recarga con una cota promedio diferente comprendida entre 600 y 800 m sobre el nivel del mar.

Las informaciones obtenidas empleando el Tritio y el Carbono 14 indican una edad mínima de más de cuarenta años y una máxima de algunos millares de años.

### **9.7.7 Relaciones ríos-acuíferos**

La hidrología del Valle de San Juan individualiza la separación entre una sub-área occidental, la cuenca del río Macasía-Artibonito, y una oriental, la cuenca del río San Juan, afluente del río Yaque del Sur.

Los principales cursos de agua del Valle juegan un papel drenante de los sistemas acuíferos, como se puede apreciar del análisis de los caudales medidos en las secciones de aforo en condiciones de agua baja.

La contribución media del flujo base constituye un 40-60% del flujo total por los ríos San Juan, Mijo y Macasía, hecho seguramente indicativo de un papel drenante del sistema acuífero jugado por los ríos Macasía y San Juan, mientras que se reduce de alrededor del 30% por el río Tocino, flujo de base que llega de los sistemas acuíferos fisurados también al exterior de la zona hidrogeológica de interés.

Para mayores detalles, refiérase a los Anexos Memorias n° 13, 14 y 15.

### 9.7.8 Evaluación de la recarga - infiltración eficaz

La zona hidrogeológica de interés, la cual se presenta en la Fig. 7.1.8./1 sacada del Mapa 9/4: Mapa hidrogeológico Valle de San Juan, tiene un área total de 2567.9 km<sup>2</sup>, una precipitación promedio anual de 1077.3 mm y una evapotranspiración potencial de referencia de 1679.0 mm así repartida:

- zona oeste (sector Macasía-Tocino): área de 1384.4 km<sup>2</sup>, precipitación promedio anual de 1173.6 mm y evapotranspiración potencial de referencia de 1700.5 mm;
- zona este (sector de San Juan): área de 1183.5 km<sup>2</sup>, precipitación promedio anual de 967.3 mm y evapotranspiración potencial de referencia de 1655.6 mm.

La zona hidrogeológica de interés se caracteriza, por lo que atañe a las áreas de recarga directa, por formaciones porosas (azul), de permeabilidad de alta (terrenos de aluvión del río San Juan y de sus principales afluentes) a baja, y por formaciones fisuradas (verde), con acuíferos de permeabilidad de alta a baja, las cuales, en conjunto, tienen una superficie de 1846.6 km<sup>2</sup>, esto es el 72% de la superficie total.

En términos generales, las aguas subterráneas proceden de tres fuentes: recarga pluvial directa, recarga por flujo de retorno de aguas de riego (exceso de riego) e infiltración en canales y recarga lateral, con referencia al sector central de la frontera sur (Sierra de Neiba).

En conjunto, teniendo en cuenta las características morfológicas, hidrogeológicas e hidrológicas, han sido individuadas 21 sub-zonas homogéneas (véase cap. 6.8.3, Fig. 7.1.8./1 y Anexo Memorias n° 14).

En conjunto (véase Tab. 7.1.8./1) la recarga pluvial directa en la zona hidrogeológica de interés alcanza los siguientes valores:

- años secos (T=10 años): 166.28 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a;
- años secos (T=5 años): 190.77 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a;
- año medio: 243.52 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a;
- años húmedos (T=5 años): 282.81 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a;
- años húmedos (T=10 años): 314.04 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a.

En fin ha sido evaluada la recarga por flujo de retorno de aguas de riego (exceso de riego) e infiltración en los principales canales.

En conjunto la recarga media anual total en la zona hidrogeológica de interés alcanza el valor de 276.15 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a así repartido:

- recarga pluvial directa: 243.52 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a;
- recarga por exceso de riego: 32.63 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a;

Por lo que atañe a la recarga lateral procedente de sistemas acuíferos cercanos en conexión hidráulica, es decir de las áreas arriba de las sub-zonas 4 y 5, teniendo en cuenta sus características climáticas y morfológicas, se puede considerar un valor de la recarga directa pluvial cotejable con aquéllos evaluados con referencia a las sub-zonas 4 y 5.

Para mayores detalles, refiérase al cap.7.1.8 y al Anexo Memorias n° 14.

### 9.7.9 Vulnerabilidad

En el sector de estudio la vulnerabilidad es generalmente baja, con áreas de vulnerabilidad más elevada en los sectores de desarrollo de los depósitos clásticos cuaternarios.

En la estrecha franja meridional a los pies de la Sierra de Neiba, la vulnerabilidad local varía desde baja hasta muy baja. En la misma franja, en dirección de la frontera con Haití, la situación se vuelve más articulada con aparición de áreas de vulnerabilidad media confinadas en los locales depósitos aluviales.

En la parte central y septentrional del Valle de San Juan, la vulnerabilidad se vuelve tendencialmente mayor, de baja a media, con aparición de amplias áreas de vulnerabilidad alta, tanto en correspondencia de los lechos aluviales actuales de los principales cursos de agua locales, como de áreas con depósitos fluviales más antiguos en los cuales la evaluación local refleja sensiblemente la escasa profundidad de la napa. La colocación en un sector de alta vulnerabilidad de una ciudad como San Juan representa un evidente factor de riesgo por cuanto en este distrito no están censadas actividades de elevado impacto potencial.

En general el desarrollo principalmente agrícola del área en cuestión, con actividades industriales contenidas y limitadas sólo a los procesos de transformación alimenticia, no determina situaciones de riesgo particularmente evidentes con relación a las actividades productivas.

### 9.7.10 Modelos matemáticos de flujo de las aguas subterráneas

El modelo de flujo, realizado a lo largo del proyecto, fue utilizado para la evaluación del impacto sobre el sistema acuífero, para la hipótesis de una extensión de la red de acueductos de las ciudades de Juan de Herrera y de San Juan (sector E) y un desarrollo generalizado de las actividades agrícolas en el área próxima al río Macasia (sector O), A pesar de las incertidumbres, esta simulación tiene un objetivo cualitativo de carácter general, o sea la evaluación del diferente impacto que las explotaciones tienen en los fértiles sectores orientales y en las formaciones porosas de baja permeabilidad del sector occidental. Obviamente esta simulación constituye la base para cualquier otra simulación más específica, relacionada con un aumento de consumos sea en campos pozos existentes que en campos de nueva realización.

En detalle los aumentos de explotación estimados fueron de aproximadamente  $2.2 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año, en el sector entre Juan de Herrera y San Juan, a lo largo de 5 pozos de nueva construcción, y de aproximadamente  $1.1 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año, uniformemente distribuida en un área del orden de 95 km<sup>2</sup>, a la izquierda del río Macasia desde el área de Las Matas de Farfán y Elías Piña;

Los resultados son de gran interés, indicando impactos muy limitados en el sector E entre Juan de Herrera y San Juan, con variaciones piezométricas limitadas a máximos de 1.3-1.4 m. Es evidente que el río San Juan juega aquí un papel fundamental como condición en el entorno, según las informaciones disponibles y por los resultados del modelo matemático (balance de flujo). En el caso específico, el flujo de base desde el acuífero hacia el río se reduce por efecto de las explotaciones.

Por lo contrario, a pesar del pequeño (y uniforme) aumento de los consumos para una discreta extensión areal, el sector occidental se caracteriza por variaciones piezométricas parecidas y tal vez superiores (máximos del orden de los 3 m). Trátase de un resultado



congruente con las características hidrogeológicas modestas de las formaciones porosas aquí presentes y obviamente indica una gran criticidad frente a explotaciones fuertes y concentradas. Además este resultado indica también una gran criticidad frente a proyectos de interés agrícola, tomando en cuenta las exigencias hídricas de los cultivos principales de este sector.

#### **9.7.11 Recursos hídricos y reservas hídricas subterráneas**

Se ha estimado un valor de recarga total del orden de los  $243.5 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a, con referencia al año promedio, valor que se reduciría a  $166.3 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a con referencia al año seco con tiempo de retorno de 10 años.

### 9.7.12 Régimen hidrológico y recursos hídricos superficiales

La hidrología del Valle de San Juan individualiza la separación entre una sub-área oriental, la cuenca del río San Juan, afluente del río Yaque del Sur y una sub-área occidental, la cuenca del río Macasía-Artibonito.

La sub-área oriental, la de mayor importancia tanto por los recursos hídricos superficiales como por los subterráneos, está caracterizada por el río San Juan y por una serie de afluentes perennes (escorrentía natural), como los ríos Jinova, Mijo y Los Baos.

Por lo que atañe al rendimiento, aparece una repartición clara entre las vertientes norte y sur. La vertiente norte, donde son alimentados los ríos San Juan, Jinova y Mijo, es más lluviosa y los ríos tienen rendimientos elevados (en la cuenca del río Mijo el rendimiento alcanza un valor de casi 32 l/skm<sup>2</sup>); la vertiente sur, en cambio, se encuentra más seca, tiene un bajo rendimiento, el río Los Baos tiene el valor más bajo en el área de estudio ( $q = 6.72$  l/skm<sup>2</sup>).

La potencialidad hídrica natural total del río San Juan es elevada, indicativamente comprendida en Sabana Alta entre los  $525 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a (año seco, T=10) y los  $712 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a (año promedio), Tab. 7.2.1./1; sin embargo el elevado nivel de utilización del recurso hídrico para fines de riego en la cuenca implica una significativa reducción de la escorrentía en el cauce, como se expone detalladamente a continuación en el pár. 7.2.2.

La sub-área occidental está caracterizada por un sistema de drenaje que confluye en el río Macasía, afluente del río Artibonito que delimita también el límite de estado con Haití. Entre otros, se encuentran el arroyo La Celibe (desde el límite oriental de la sub-área), los ríos Los Naranjos, Caño y Comendador en el lado sur, y los ríos Yabonico y Yacahueque en el lado norte. Cañadas secas y arroyos se encuentran en gran número en todo el sector de interés.

La cuenca del río Macasía, la cual en conjunto tiene un rendimiento menor que la cuenca del río San Juan, presenta una discreta potencialidad hídrica natural, indicativamente comprendida en Rinconcito entre los  $299 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a (año seco T=10), y los  $514 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a (año promedio), Tab. 7.2.1./1, sin embargo la utilización del recurso hídrico para fines de riego en la cuenca implica una discreta reducción de la escorrentía en el cauce, como se expone detalladamente a continuación, pár 7.2.2.

Por lo que atañe a la identificación de la entidad promedio mensual de la escorrentía torrencial y del flujo base, fue preciso basarse en los resultados de la aplicación de los modelos matemáticos lluvia-escorrentía (véase pár. 7.2.3 y Anexo Memorias n°15) por los cuales resultó:

#### cuenca del río Yaque del Sur - San Juan:

- río Yaque del Sur en El Puente, una contribución media del flujo base alrededor del 71% de la escorrentía total ( $cv = 0.30$ );
- río Mijo (San Juan) en El Cacheo, una contribución media del flujo base alrededor del 48% de la escorrentía total ( $cv = 0.16$ );
- río Los Baos (San Juan) arriba confluencia con el río San Juan, una contribución

- media del flujo base alrededor del 79% de la escorrentía total ( $cv = 0.35$ );
- río San Juan en Paso de Lima, una contribución media del flujo base alrededor del 59% de la escorrentía total ( $cv = 0.12$ );
  - río San Juan en Sabana Alta, una contribución media del flujo base alrededor del 56% de la escorrentía total ( $cv = 0.18$ );

cuenca del río Macasía:

- río Macasía en Ranchito, una contribución media del flujo base alrededor del 54% de la escorrentía total ( $cv = 0.34$ );
- río Macasía en Rinconcito, una contribución media del flujo base alrededor del 45% de la escorrentía total ( $cv = 0.30$ );

Para mayores detalles a los Anexos Memorias n° 13, 15 y 17.

### 9.7.13 Identificación de zonas con regadío actual y potencialmente regables - Evaluación de las necesidades hídricas para el riego

Las actividades agronómicas y edafológicas efectuadas han permitido identificar las áreas con regadío actual y las potencialmente regables. Le attività agronomiche e pedologiche effettuate hanno permesso di identificare le aree con irrigazione attuale e quelle potenzialmente irrigabili.

Las áreas con regadío han sido ulteriormente subdivididas entre las regadas con aguas subterráneas, con aguas superficiales y con sistemas mixtos. Le aree irrigue sono state ulteriormente suddivise fra quelle irrigate con acque sotterranee, con acque superficiali e con sistemi misti.

Estas áreas han sido indicadas en la cartografía en escala 1:100.000. Queste aree sono state riportate nella cartografia in scala 1:100.000.

Se recuerda que el criterio utilizado para la delimitación de las áreas con regadío y de las potencialmente regables ha sido el de la predominancia, que considera, en el interior de un área cartografiable, el cultivo predominante; las áreas además han sido delimitadas al bruto de carreteras, viviendas, pequeñas áreas no cultivadas, etc. Si ricorda che il criterio utilizzato per la delimitazione delle aree irrigue e di quelle potenzialmente irrigabili è stato quello della prevalenza, che considera, all'interno di un'area cartografabile, la coltura prevalente; le aree inoltre sono state delimitate al lordo di strade, abitazioni, piccole aree non coltivate ecc.

En el Valle de San Juan se han obtenido los siguientes datos:

<u>total superficie agrícola</u>	<u>totale superficie agricola:</u>	81.473	ha
<u>total áreas con regadío</u>	<u>totale aree irrigue:</u>	45.578	ha
<u>total áreas con regadíos con aguas superficiales</u>	<u>“ “ “ “ “ “</u>		
<u>superficiales:</u>		45.578	ha

La Valle de S. Juan no presenta la posibilidad de extender a nuevas áreas el riego, excepto las tierras individualizadas como ocasionalmente regadías; en relación con la cantidad de agua disponible, estas áreas deberían recibir un suministro mayor de agua y alcanzar buenos niveles de producción; se considera por lo tanto que su puesta en cultivo no total dependa de razones distintas de aquéllas estrictamente agronómicas.

Entre las zonas individualizadas como no regadías, predominantemente ocupadas por pastos y en menor medida por cultivos mixtos, algunas presentan suelos con características edafológicas y topográficas tales que excluyen su puesta en cultivo; otras zonas, aun presentando terrenos con mejores características de idoneidad para la agricultura, impondrían costos de plantación y de gestión muy elevados.

En el conjunto, las áreas susceptibles al riego suman 16.175 ha. Nel complesso, le aree suscettibili di irrigazione individuate nel distretto di Neiba ammontano a 10.747 ha.

De éstas, 282 ha pertenecen a la primera clase de susceptibilidad y por lo tanto no presentan limitaciones de carácter agronómico; 2214 ha pertenecen a la segunda clase, 2549 a la tercera y 11.130 a la cuarta. Di questi, 2.370 ha appartengono alla prima classe di suscettibilità e quindi non presentano limitazioni di carattere agronomico; 3.195 ha appartengono alla seconda classe e 5.182 alla terza.

Por lo que concierne en fin a las necesidades hídricas de los principales cultivos encontrados en el Valle de San Juan, la demanda neta anual por hectárea asume un valor promedio de 522 mm, oscilando desde un mínimo de 336 hasta un máximo de 1471 mm anuales. Per quanto riguarda infine le necessità idriche delle principali colture riscontrate nella Valle de Neiba, la domanda netta annua per ettaro assume un valore

medio di 905 mm, oscillando da un minimo di 323 a un massimo di 1484 mm annui.

#### **9.7.14 Utilización de las aguas subterráneas**

Un análisis de las tomas evidencia cómo éstas son de entidad generalmente muy limitada, concentradas en correspondencia de los centros poblados principales y menores, para uso potable, y generalmente escasamente relevantes para fines agrícolas. Los pozos, aun siendo numerosos, son generalmente para uso local y caracterizados por caudales muy pequeños.

Los cursos de agua principales (el río San Juan al E y el río Macasía al O) constituyen la base del drenaje regional, al cual vuelve buena parte de los recursos hídricos subterráneos utilizables.

La neta separación de tipo socio-económico que caracteriza a los 2 distintos sectores hidrogeológicos del valle (San Juan, al E, Las Matas de Farfán-Elías Piña, al O) puede imputarse por último a la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos. En tal sentido, también el sector oriental al S del río San Juan resulta casi abandonado, en relación tanto con las características hidrogeológicas desfavorables como con la ausencia de un sistema de canalización significativo de recursos superficiales.

### 9.7.15 Utilización de las aguas superficiales

En sentido hidrológico el Valle está caracterizado por dos sistemas fluviales independientes: la cuenca del río San Juan al este, afluente del río Yaque del Sur, la de mayor importancia por los recursos hídricos superficiales, y la cuenca del río Macasía-Artibonito al oeste.

La potencialidad hídrica natural total de las dos cuencas es elevada, comprendida indicativamente entre los  $525 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a (año seco T=10) y los  $712 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a (año promedio), con referencia a la cuenca del río San Juan, y entre los  $299 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a (año seco T=10) y los  $514 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a (año promedio), para la cuenca del río Macasía.

La demanda de recurso hídrico superficial en el Valle de San Juan resulta articulada de la siguiente manera (véanse Tablas 7.1.11./1 y 7.2.2./1-2):

- cuenca del río San Juan:
  - para aprovechamiento urbano (aguas potables): caudal de explotación comprendido entre  $16.3 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a y  $32 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a (INAPA);
  - para riego: la hidroexigencia neta, con exclusión de la sub-cuenca del río Vallejuelo, puede estimarse en aproximadamente  $180 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a (equivalente a una demanda bruta del orden de los  $450 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a, eficiencia global de riego de alrededor del 40%, valor cotejable con el conjunto de los caudales máximos promedio de los canales de riego, igual a 13 m<sup>3</sup>/s equivalentes a  $410 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a).
  
- cuenca del río Macasía:
  - para aprovechamiento urbano (aguas potables): caudal de explotación comprendido entre  $3.8 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a (INAPA);
  - para riego: la hidroexigencia neta puede estimarse en aproximadamente  $62 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a, (equivalente a una demanda bruta comprendida entre 248 y  $310 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a, eficiencia global de riego entre el 20 y el 25%, valor cotejable con el conjunto de los caudales promedio de operación de los canales de riego, igual a aproximadamente 9.8 m<sup>3</sup>/s equivalentes a  $296 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a).

Sin embargo, el elevado nivel de utilización de los recursos hídricos para fines de riego en ambas cuencas implica una significativa reducción de la escorrentía en el cauce y la verificación de posibles situaciones de criticidad.

En la cuenca del río San Juan el grado de explotación de las aguas superficiales, en particular para fines de riego, es muy alto; con referencia a los años 1983 y 1986-92 la reducción general de la escorrentía en el cauce puede estimarse en aproximadamente el 42% de la escorrentía promedio natural, aun teniendo en cuenta la entrada a los cauces de parte de las aguas de exceso de riego.

Situación representativa de un nivel de utilización del recurso tendenciosamente crítica, aun manteniéndose la escorrentía natural total con valores mayores que las tomas brutas totales (que pueden estimarse en aproximadamente  $466-482 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a) aun en años secos.

Sin embargo, resultando el entero sistema Yaque del Sur en condiciones de hecho

críticas de utilización del recurso hídrico (véanse Memorias finales n° 3 (Planicie de Azua) y 5 (Valle de Neiba) y Anexo Memorias n° 17) ulteriores utilizaciones de los recursos superficiales en la cuenca del río Yaque del Sur podrían dar lugar a situaciones de desequilibrio no tanto de la cuenca misma, sino sobre todo aguas abajo, por ejemplo en el sector Los Guiros-Palo Alto, en particular en años hidrológicamente secos.

Por lo que atañe al riesgo de posibles comprometimientos ambientales en el cauce del río San Juan, sobre la base del actual nivel local de utilización del recurso superficial, no parecen emerger situaciones de criticidad particular.

Refiriéndose en cambio a específicas situaciones interiores de la cuenca, se puede observar cómo de hecho resulta en condiciones críticas, ya con referencia al año promedio sólo la sub-cuenca del río Los Baos (al margen se recuerda que la cuenca del río Los Baos tiene el rendimiento natural más bajo en toda el área de estudio).

También en la cuenca del río Macasía el grado de explotación de las aguas superficiales, en particular para fines de riego, es bastante alto, aunque es globalmente inferior a la cuenca del río San Juan. En conjunto, aproximadamente el 36% de la esorrentía promedio natural anual y el 62% de la relativa a un año seco (T=10) resulta utilizado, situación representativa de un nivel de utilización del recurso tendenciosamente crítico, en particular en años secos.

Ulteriores utilizaciones de los recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Macasía, al neto de específicos acuerdos con la República de Haití, podrían dar lugar por lo tanto a situaciones de desequilibrio.

### 9.7.16 Modelos matemáticos lluvia-escorrentía

Sobre la base de la información climatológica disponible se han reconstruido las escorrentías naturales diarias en correspondencia de las secciones de:

- río Yaque del Sur en El Puente (vieja estación del INDRHI, código 490001), superficie = 1620.64 km<sup>2</sup>, período 1968-1969, 1972, 1974-1978 y 1984-1994 (19 años);
- río Mijo en El Cacheo (vieja estación del INDRHI, código 493201), superficie = 161 km<sup>2</sup>, período 1983-1994 (12 años);
- río Los Baos en Vallejuelo (vieja estación del INDRHI, código 493802), superficie = 207 km<sup>2</sup>, período 1979-1994 (16 años);
- río Los Baos arriba de la confluencia con el río San Juan (código 493803), superficie = 416 km<sup>2</sup>, período 1979-1994 (16 años);
- río San Juan en Paso de Lima (vieja estación del INDRHI, código 493006), superficie = 315 km<sup>2</sup>, período 1983-1994 (12 años);
- río San Juan en Sabana Alta (estación del INDRHI, código 493007), superficie = 1900 km<sup>2</sup>, período 1983-1994 (12 años);
- río Yaque del Sur en Villarpando (vieja estación del INDRHI, código 490002), superficie = 3521 km<sup>2</sup>, período 1984-1994 (11 años);
- río Macasía en Ranchito (estación del INDRHI, código 543002), superficie = 693 km<sup>2</sup>, período 1973-1994 (22 años);
- río Macasía en Rinconcito (vieja estación del INDRHI, código 543004), superficie = 1494 km<sup>2</sup>, período 1973-1994 (22 años).

Todos los cursos de agua de las cuencas de los ríos Yaque del Sur - San Juan y Macasía, cuyas escorrentías naturales han sido reconstruidas mediante el modelo matemático, excepto el río Mijo (San Juan) en El Cacheo y el río San Juan en Paso de Lima, resultan significativamente afectados por obras de toma para fines de riego que, juntamente a los dos embalses de Sabaneta (río San Juan) y de Sabana Yegua (río Yaque del Sur) implican condiciones de escorrentía reales notablemente diferentes respecto de las condiciones naturales. Esta situación se deduce tanto del cotejo entre los hidrogramas y las curvas de duración medidas y calculadas (Anexo Memorias n° 15, Apéndice G), como de lo expuesto a este respecto en los Anexos Memorias n° 13 y 17.

Los resultados de la aplicación del modelo matemático están presentados de forma numérica y gráfica (valores promedio mensuales y anuales, hidrogramas en base diaria de los valores del caudal reconstruidos junto, donde existan, con los valores medidos, curvas de duración medidas y reconstruidas, valores anuales de las precipitaciones y de los componentes superficial (escorrentía torrencial) y profundo (flujo base), indicadores hidrológicos de los caudales de estiaje y valores del caudal natural promedio anual de asignada probabilidad según el modelo logarítmico-normal) para cada cuenca anteriormente citada, en el Anexo Memorias n° 15, junto a los datos que caracterizan a la calibración.

Las principales características del régimen de la escorrentía natural reconstruida pueden así sintetizarse, con referencia a las principales cuencas:

- río Yaque del Sur en El Puente



precipitación promedio = 1221 mm; escorrentía total promedio = 434 mm ( $Q = 22.18 \text{ m}^3/\text{s}$ ); valores en promedio altos del coeficiente de escorrentía caracterizados por una elevada variabilidad temporal; régimen hidrológico de tipo permanente y contenida variabilidad temporal de los caudales de estiaje. (

- río San Juan en Sabana Alta

precipitación promedio = 1246 mm; escorrentía total promedio = 384 mm ( $Q = 22.59 \text{ m}^3/\text{s}$ ); régimen hidrológico de tipo permanente; contenida variabilidad temporal de los caudales de estiaje consiguiente tanto a la entidad del aporte del flujo base, como a la modesta variabilidad temporal de las lluvias y de las escorrentías en la cuenca y buena permanencia en el cauce de valores de la escorrentía de interés para fines de utilización.

- río Yaque del Sur en Villarpando

precipitación promedio = 1251 mm; escorrentía total promedio = 422 mm ( $Q = 47.07 \text{ m}^3/\text{s}$ ); valores en promedio significativos del coeficiente de escorrentía caracterizados por una discreta variabilidad temporal; régimen hidrológico de tipo permanente y contenida variabilidad temporal de los caudales de estiaje consiguiente tanto a la entidad del aporte del flujo base, como a la modesta variabilidad temporal de las lluvias y de las escorrentías en la cuenca.

- río Macasía en Rinconcito (superficie =  $1494 \text{ km}^2$ ):

precipitación promedio = 1288 mm; escorrentía total promedio = 343 mm ( $Q = 16.29 \text{ m}^3/\text{s}$ ); valores en promedio bajos del coeficiente de escorrentía caracterizados también por una discreta variabilidad temporal; régimen hidrológico de tipo torrencial aunque permanente y reducida variabilidad temporal de los caudales de estiaje.

Para mayores detalles y por los resultados gráficos y numéricos de la aplicación del modelo matemático, refiérase al Anexo Memorias n° 15.

### 9.7.17 Cantidades explotables de agua

Con respecto a los recursos hídricos subterráneos, con referencia a las dos cuencas que constituyen el Valle, los resultados del análisis desarrollado ponen en evidencia:

- en la cuenca del río Macasía, el modelo matemático ha puesto en evidencia cómo aun modestos incrementos de las tomas implicarían impactos considerables tanto sobre los niveles piezométricos como sobre el régimen de los caudales de estiaje del río Macasía. De acuerdo también con el cuadro hidrogeológico más bien desfavorable, no se vislumbran en este sector posibilidades concretas de un incremento generalizado de las tomas,
- en la cuenca del río San Juan, el modelo matemático ha puesto en evidencia impactos menores sobre el régimen hidrogeológico e hidrológico (caudales de estiaje) de ulteriores tomas de aguas subterráneas. Sin embargo se aconseja destinar eventuales nuevas tomas sólo al uso hidropotable, en particular por los menores volúmenes en juego respecto de las utilidades agrícolas. Por lo que atañe a la parte meridional del sector (al sur del río San Juan) las condiciones son en cambio generalmente muy críticas.

Con respecto a los recursos hídricos superficiales y con referencia a las dos cuencas que constituyen el Valle, los resultados del análisis desarrollado ponen en evidencia:

- en la cuenca del río Macasía, el grado de explotación de las aguas superficiales, en particular para fines de riego, es bastante alto aunque es en conjunto inferior al de la cercana cuenca del río San Juan. En términos generales la reducción de la escorrentía es significativa, aproximadamente el 36% de la escorrentía promedio natural anual y al 62% de la escorrentía natural relativa a un año seco con período de retorno de 10 años, aun teniendo en cuenta la entrada a los cauces de parte de las aguas de exceso de riego.

Ulteriores utilidades de los recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Macasía, al neto de específicos acuerdos con la República de Haití, podrían dar lugar por lo tanto a situaciones de desequilibrio en particular en años secos. Además tomas de aguas subterráneas, aun de entidad globalmente modesta pueden implicar significativas distorsiones del régimen de los caudales de estiaje, hasta también implicar la anulación de las escorrentías de estiaje, pasaje de régimen permanente a esporádico.

- en la cuenca del río San Juan, el grado de explotación de las aguas superficiales, en particular para fines de riego, es muy alto; en términos generales la reducción de la escorrentía puede estimarse en aproximadamente el 42% de la promedio natural, aun teniendo en cuenta la entrada a los cauces de parte de las aguas de exceso de riego. Situación representativa de un nivel de utilización del recurso tendenciosamente crítica, aun manteniéndose la escorrentía natural total con valores mayores que las tomas brutas totales aun en años secos. Sin embargo, resultando el entero sistema Yaque del Sur en condiciones de hecho críticas de utilización del recurso hídrico, ulteriores utilidades de los recursos superficiales en la cuenca del río San Juan podrían dar lugar a situaciones de desequilibrio no tanto en la cuenca misma (sólo el río Los Baos está de hecho en condiciones de sobreexplotación), sino, sobre todo, aguas abajo en la cuenca del río Yaque del Sur, sector Los Guiros-Palo Alto, en particular en años hidrológicamente secos.

## 9.8 Recomendaciones

El cierre del proyecto concluyó la fase preparatoria de la puesta en marcha de un control sistemático de los recursos hídricos subterráneos de las seis áreas consideradas. A la luz de los resultados obtenidos, es evidente la necesidad de llevar a cabo actividades de monitoreo en el futuro que impliquen las obtención de los máximos resultados con el mínimo esfuerzo. La red operativa aun basándose en el esqueleto constituido por la utilizada en el curso del proyecto, deberá ser optimizada tanto por lo que se refiere a la frecuencia y a los parámetros controlados como en su distribución areal.

La relativa constancia del quimismo evidenciada por los muestreos sucesivos permite prever, salvo el registro de datos anómalos, un muestreo semestral, en función de las dos estaciones que caracterizan la climatología tropical de la Isla La Española; en particular se considera ideal efectuar los muestreos al comienzo de la estación húmeda y de la seca.

Naturalmente, en el caso en que en uno o más puntos se relevasen empeoramientos significativos de los parámetros controlados, se deberá planificar un monitoreo con mayor frecuencia, a fin de mantener el control del fenómeno en acto.

Se aconseja tener bajo control todos los parámetros que fueron objeto de las campañas de monitoreo en el curso del proyecto, y analizar los resultados sobre la base de los límites de potabilidad. Lo que a primera vista podría parecer un exceso de rigidez, en realidad responde a las exigencias socio-económicas del país. La presencia de muchos centros poblados menores y de instalaciones rurales, autónomos para el abastecimiento hidropotable, requiere la selección de las condiciones más conservadoras. Esta elección naturalmente no impide que se evalúe la posibilidad de utilización del recurso también para otros fines menos calificados.

Las características de selección de los puntos de la red propuesta fueron definidos teniendo en cuenta las siguientes indicaciones:

1. Para los puntos inventariados en el curso del proyecto e incluidos en la red utilizada:

indicaciones dadas por el monitoreo;  
características de los pozos (perforados, excavados, tipo de acuífero captado, presencia de un equipo de bombeo);  
distribución areal.

2. Para los puntos inventariados en el curso del proyecto, pero no incluidos en la red utilizada:

distribución areal, a fin de integrar, donde sea necesario, la red utilizada;  
características de los pozos (perforados, excavados, tipo de acuífero captado, presencia de un equipo de bombeo).

Los 31 en el Valle de San Juan, estan en el mapa de la red de control de calidad y de la intrusión marina (Mapa 3).

En la eventualidad de que los puntos indicados en el Mapa 3 no fueren disponibles en el futuro, ellos deberán ser sustituidos con otros circundantes, que respondan a los criterios arriba enumerados.

Para afinar la interpretación isotópicas, en general, sería necesario disponer de:

- Una red de muestreo de las precipitaciones que pueda cubrir de manera homogénea el área.
- Una red de monitoreo geoquímico e isotópico de las aguas superficiales que pueda describir los procesos hidrológicos e hidrodinámicos que tienen lugar bajo diferentes condiciones.

Sólo con la comparación los isótopos y la geoquímica pueden dar explicaciones y pueden ser aprovechados para una correcta elaboración de los modelos de los sistemas.

A seguito della evaluación de la calidad potable de las aguas subterráneas, el cotejo con los términos normativos tanto de la ley nacional vigente (NORDOM 64) como con lo prescrito por la OMS en la emanación de 1993 y por la Directiva CEE n°778 de 1980, ha hecho emerger una cierta inadecación de los algunos de los límites fijados por la norma nacional, que ha resultado tan restrictivos, como injustificados, que una aplicación rigurosa habría determinado un juicio final negativo casi para la mayoría de las aguas consideradas

En tal sentido se sugiere al legislador una revisión por lo menos de los límites relativos a la dureza total (fijare un límite a 100 mg/l cuanto ésta o no está reglamentada [CEE] o es por lo menos 5 veces más alta [500 – OMS], significa prohibir por exceso de dureza también el uso de aguas consideradas por lo común poco duras) y a los sólidos disueltos, que resultan ser respectivamente la mitad y un tercio de los límites de OMS y CEE

Siempre en tema de aguas potables, con respecto a su protección, la falta de una referencia nacional en la definición de las acciones a emprender para la protección de las captaciones de aguas potables, no ha permitido, en el ámbito del proyecto, definir ni la geometría ni la gradación de las franjas de respeto de los pozos además de las tipologías de actividades a prohibir en el interior de las mismas.

En tal sentido resulta indispensable que la misma República Dominicana, sobre la base de las experiencias de los demás países, se dote de un propio instrumento normativo que sea apropiado, y realísticamente aplicable, a las peculiaridades del país mismo.

En tal sentido resulta indispensable que la misma República Dominicana, sobre la base de las experiencias de los demás países, se dote de un propio instrumento normativo que sea apropiado, y realísticamente aplicable, a las peculiaridades del país mismo.

En términos generales, podríamos sugerir un método para afrontar el problema que respete las siguientes líneas guía en la delimitación de zonas en las cuales se respetan vínculos para la protección de las aguas subterráneas:

Área de protección directa. Debe referirse únicamente a la obra de captación y deben impedirse las infiltraciones desde la superficie, delimitando una zona a impermeabilizar con arcilla que debe extenderse sobre una lámina de polietileno. El terreno que rodea al pozo debería protegerse ulteriormente con una cobertura de cemento.

Área de protección territorial Debería referirse a la zona ubicada alrededor de las captaciones en la cual se prohíbe o se reglamenta cualquier actividad potencialmente contaminadora. La protección territorial podría realizarse considerando tres franjas distintas:

*Franja A* – Área de prohibición total de cualquier actividad, salvo cultivos de pradera o bosque, siempre y cuando no se utilicen abonos, pesticidas, herbicidas, etc.

*Franja B* – Deben estar prohibidas las actividades susceptibles de alteración de las modalidades de flujo y alimentación natural de las aguas subterráneas. Las actividades

en el interior de esta franja deben garantizar que no haya contaminación bacteriana, que las sustancias no biodegradables no puedan llegar hasta las aguas subterráneas, que aquéllas biodegradables no constituyan una carga biológica suplementaria (ej. consumo de oxígeno). Por último, debe quedar tiempo suficiente, en caso de contaminación, para realizar una obra de saneamiento. En esta zona no deberían realizarse construcciones desagües, canales, ni deberían esparcirse en el terreno sustancias químicas como fertilizantes, antiparasitarios, etc.

*Franja C* – Deben estar reglamentadas y controladas las actividades potencialmente contaminadoras, limitando el número de instalaciones y operando de manera que haya una dilución suficiente de las aguas subterráneas antes que la contaminación llegue hasta los pozos.

La delimitación de dichas áreas podrá definirse adoptando un criterio a elegirse entre el geométrico, el temporal y el hidrogeológico, remarcando de todos modos dos principios que deberían inspirar la zonación:

- La ejecución de las nuevas captaciones deber estar subordinada a la posibilidad de establecer las franjas de respeto.
- En territorios ya urbanizados, la funcionalidad de las franjas puede mostrar una eficacia limitada; en tal caso deberían potenciarse los sistemas de control preventivo de la calidad de las aguas subterráneas.

A fin de aumentar la eficiencia regadía y limitar las pérdidas de agua, sería oportuno tener en mayor consideración las propiedades limitantes de los suelos, a través de un mejor uso de los mismos, dado que a menudo los cultivos no resultan estar adecuadamente distribuidos en relación con las condiciones de los suelos, del clima y de la disponibilidad de agua, con graves repercusiones sobre la rentabilidad.

Por ejemplo, en los terrenos de textura pesada, caracterizados por alta retención de humedad y drenaje imperfecto, con escasa o ausente pedregosidad, podrían incentivarse los cultivos de radicación superficial, como papa (usando variedades adecuadas como la red pontiac), batata, maíz, frijoles, plátano, berenjena, maní.

Con sencillas prácticas agronómicas, como nivelados, siembras en surcos, necesarios aportes de potasio y fósforo y la construcción de drenajes para evitar estancamientos de agua, con una dotación de agua basada estrictamente en la demanda de estos cultivos, se obtendrían elevados rendimientos unitarios y aumento de la eficiencia del riego.

Donde las limitaciones principales están constituidas por escasa profundidad, topografía ondulada, alta tendencia a la erosión, abundante pedregosidad y fertilidad natural baja, los cultivos deberían limitarse a tipologías como aguacate y cítricos, que implican pocas labores de cultivo, pero requieren oportunas prácticas de conservación del suelo, como la construcción de barreras para evitar la erosión, el enterramiento de los residuos orgánicos y el uso de sistemas de riego por aspersión, a fin de aumentar la eficacia de riego y evitar la erosión del suelo,

además que los necesarios aportes de fertilizantes de corrección o de fondo, para garantizar un buen resultado de las cosechas.

Por lo que concierne a las áreas individualizadas como potencialmente regables, éstas están constituidas por núcleos de extensión variada, limítrofes o no a las zonas actualmente con regadío. La conveniencia de llevar el agua a todos estos cuerpos es dudosa, considerando que una parte de estas superficies ya se cultiva utilizando aguas de sistemas de riego (pero que no son suficientes para satisfacer a toda la zona) o aguas meteóricas procedentes de las colinas cercanas o de ríos.

También las aguas de drenaje, que representan un recurso importante, podrían ser mejor utilizadas para extender la superficie cultivada, a través de dos posibilidades: mezclar las aguas recuperadas con aguas frescas, de modo que lleguen a un grado de salinidad tal que sea posible realizar un riego normal, o utilizarlas separadamente considerando la agricultura que deriva como algo complementario.

La condición necesaria para la utilización de las aguas recuperadas es que lleguen al lugar de uso con la misma salinidad con la que salen de los canales de las áreas con regadío, evitando contaminaciones con aguas de calidad inferior, hecho que implicaría una serie de obras indudablemente costosas para mejorar la red de los canales existentes.

La primera solución podría ser considerada en caso de que se quiera extender al máximo el riego normal de los terrenos o por lo menos de los mejores individualizados.

La mezcla de las aguas frescas y recuperadas debe establecerse en relación con las características de cada tipo de suelo y cultivo, a fin de llegar a una dosis que corresponda al mejor uso de los recursos disponibles. Esta solución teóricamente aceptable, puede presentar varias incógnitas y resulta necesario verificar si vale la pena correr riesgos para utilizar una cantidad de agua al final de cuentas bastante modesta. La otra solución más sencilla sería utilizar las aguas recuperadas así como están, para regar entre los terrenos peores aquéllos con mejor drenaje. Se tratará de ofrecer a los agricultores un rédito suplementario, utilizando plenamente la capacidad laboral de sus familias.

A la luz de los resultados conseguidos en el ámbito de las actividades de modelización de flujo (calibración y simulación) se recomienda contener las tomas de aguas subterráneas dentro de valores mínimos y por lo general para usos hidropotables, tanto por lo que concierne al sector oriental (Planicie de San Juan, inmediatamente al O y al N del río San Juan) donde abundan los recursos hídricos superficiales, como por lo que concierne al sector occidental (Matas de Farfán – Elías Piña). En este último, el modelo ha puesto en evidencia en efecto, en el respeto del cuadro general emergido de las actividades de campo, condiciones generalmente muy desfavorables, con impactos considerables aun frente a aumentos reducidos de las tomas de aguas subterráneas.

Por lo que se refiere a las actividades en el ámbito de la climatología, de la hidrología y del manejo de los recursos hídricos superficiales, a la luz de los resultados conseguidos y para garantizar la posibilidad de un control sistemático tanto de la oferta como de la utilización de los recursos hídricos como ayuda para un manejo sostenible y eficaz de los mismos, se recomienda:

- climatología:
  - la instalación de por lo menos dos nuevas estaciones; una en la Cordillera Central (vertiente norte) y una en la cuenca del río Los Baos (Vallejuelo) como integración y complemento de la red meteorológica instalada en el curso del proyecto;
  - mantener eficiente la actual red meteorológica (estaciones instaladas en el curso del

proyecto, actuales redes INDRHI y ONAMET), rindiendo disponible de esta manera, para el futuro control meteorológico, una red moderna suficientemente amplia y articulada en el territorio de interés, integrada con las estaciones climáticas sugeridas aquí arriba;

- instalar un evaporímetro en el embalse de Sabana Yegua para llegar a una correcta evaluación de las pérdidas directas por evaporación como ayuda, junto con los resultados del modelo lluvia-escorrentía, para el manejo hidrológico del mismo;

- hidrología:

se sugiere la activación de la red hidrométrica de control como hemos indicado en el Anexo memorias n° 13 y presentado en el Mapa n° 2, red constituida por estaciones hidrométricas, para garantizar un control en base diaria de los principales cursos de agua, y por secciones de aforo en las cuales efectuar mediciones de caudal con cadencia mensual en los ríos menores y sobre todo en los canales para riego (en particular en la cuenca del río Macasía, que actualmente no es objeto de control sistemático). Por lo que atañe a los canales de riego, se recuerda que el conocimiento de la entidad de los recursos efectivamente tomados es fundamental a fin de evaluar correctamente tanto el actual nivel de solicitación sobre el régimen fluvial, como el efecto, en particular sobre las escorrentías de estiaje (equilibrio ecológico), de menores tomas consiguientes a mejoramientos de la actual eficiencia de los sistemas de riego.

- manejo de los recursos hídricos:

teniendo en cuenta el actual elevado nivel de utilización, tendenciosamente crítico, se sugiere:

- evaluar, también sobre la base de consideraciones de tipo biológico, la entidad del caudal ecológico en los cauces de los ríos, se recuerda que el caudal ecológico definido sólo sobre la base de los criterios hidrológicos representa de todas maneras un umbral mínimo que debe garantizarse al ecosistema fluvial;

- evaluar oportunas modalidades operativas para mejorar la eficiencia de los sistemas de riego tanto para reducir el riesgo de situaciones de sequía socio-económica (insatisfacción de los usuarios) aun en años moderadamente secos en sentido hidrológico, como para garantizar, liberando recursos actualmente ocupados, condiciones de escorrentía en el cauce (flujo base, caudales de estiaje) compatibles con los equilibrios ambientales del sistema fluvial en su conjunto. En un segundo momento será posible hipotetizar, también con la ayuda de los modelos de simulación suministrados, la posibilidad y sostenibilidad de ulteriores utilidades disipadoras, en particular agrícolas, del recurso hídrico.

Por lo que atañe en particular a la cuenca del río San Juan, se recuerda que para garantizar una utilización sostenible de los recursos hídricos, la actividad de planificación debe referirse necesariamente al entero sistema cuenca del río Yaque del Sur (véase en particular la Memoria Final n° 5, Valle de Neiba), operando según un método “supply-demand oriented”.

En efecto, aunque actualmente, sobre la base del actual nivel local de utilización del recurso superficial, en la cuenca del río San Juan, con excepción de la sub-cuenca del río Los Baos, no parezcan emerger situaciones de criticidad particular (riesgo de situaciones de sequía socio-económica y de posibles comprometimientos ambientales en el cauce de los ríos), los recursos hídricos fluentes resultan estar de hecho vinculados por las utilidades existentes en el río Yaque del Sur aguas abajo de la confluencia y por la exigencia de no comprometer ulteriormente el equilibrio ambiental de su curso bajo (tramo Los Guiros, desembocadura al mar). Obviamente resultan

posibles utilizaciones del recurso de tipo conservativo, como producción de energía hidroeléctrica.

Por último, en el ámbito de las actividades de ayuda para una planificación sostenible de las cuencas de los ríos Macasía y San Juan-Yaque del Sur, se sugiere definir alternativas sostenibles de manejo, en particular en condiciones de sequía tanto en sentido climático como socio-económico, también mediante la aplicación en escala de cuenca (río Macasía y río Yaque del Sur en su conjunto), del código de balance WEAP suministrado en el ámbito del proyecto, también para evaluar el impacto de diferentes escenarios de uso en términos de costos-beneficios, previa integración y complemento de la información necesaria, en particular sobre el trend temporal de las tomas, la eficiencia del riego, el nivel de contaminación de la aguas y, para el río Maxcasía, sobre vínculos ligados al carácter internacional de la cuenca, informaciones actualmente no completamente disponibles.



## FIGURAS

## TABLAS