

## 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   | 16        |
| <b>6 ACTIVIDADES DE CAMPO Y ESTUDIOS</b>                                    | <b>17</b> |
| 6.1 Actividades preliminares  | 17        |
| 6.1.1 Colección de los datos y recopilación de antecedentes                 | 17        |
| 6.1.2 Inventario de puntos de agua  | 21        |
| 6.2 Base de datos y Sistema de Información Geográfica (SIG)                 | 25        |
| 6.2.2 Implementación de un sistema de información geográfica                | 26        |
| 6.3 Piezometría   | 29        |
| 6.3.1 Campañas piezométricas  | 29        |
| 6.3.2 Determinación de las coordenadas plano-altimétricas de puntos de agua | 31        |
| 6.3.3 Levantamiento taquimétrico de puntos de agua                          | 33        |
| 6.4 Hidroquímica e intrusión marina   | 35        |
| 6.4.1 Muestreo y análisis para la calidad de las aguas                      | 35        |
| 6.4.2 Muestreo y análisis isotópicos  | 37        |
| 6.4.3 Muestreo y análisis para la potabilidad                               | 37        |
| 6.4.4 Muestreo y análisis para aguas minerales y minero-medicinales         | 40        |
| 6.4.5 Control de la salinidad y de la intrusión marina                      | 40        |
| 6.5 Geofísica   | 42        |
| 6.5.1 Objetivos de las campañas geofísicas                                  | 42        |
| 6.5.2 Cantidades previstas y ejecutadas                                     | 42        |
| 6.5.3 Metodologías de prospección y de interpretación utilizadas            | 42        |
| 6.5.4 Equipos utilizados  | 45        |
| 6.5.5 Interpretación de los resultados                                      | 45        |
| 6.6 Realización de sondeos de exploración y de ensayos de bombeo            | 48        |
| 6.6.1 Realización de sondeos de exploración                                 | 48        |
| 6.6.2 Realización de ensayos de bombeo                                      | 49        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>6.7 Integración de la red meteorológica existente</b>                            | <b>51</b> |
| <b>6.8 Hidrología</b>   | <b>52</b> |
| 6.8.1 Campañas de aforos en los ríos y canales                                      | 52        |
| 6.8.2 Instalación de regletas hidrométricas   | 53        |
| 6.8.3 Evaluación de la recarga  | 53        |
| 6.8.4 Estudios hidrológicos - modelización lluvia-escorrentía                       | 54        |
| <b>6.9 Agronomía - Edafología</b>   | <b>57</b> |
| 6.9.1 Campaña agronómica y edafológica  | 57        |
| 6.9.2 Identificación zonas con regadío actual y de zonas potencialmente regables    | 58        |
| <b>6.10 Evaluación de la utilización del agua</b>                                   | <b>63</b> |
| 6.10.1 Instalación de contadores volumétricos                                       | 63        |
| 6.10.2 Balances hídricos aguas subterráneas   | 64        |
| 6.10.3 Balances hídricos aguas superficiales  | 65        |
| <b>6.11 Cartografía temática</b>  | <b>67</b> |
| 6.11.1 Realización de cartografía hidrogeológica                                    | 67        |
| 6.11.2 Realización de cartografía de vulnerabilidad                                 | 68        |
| <b>6.12 Modelización</b>  | <b>77</b> |
| 6.12.1 Modelos matemáticos de flujo de las aguas subterráneas y de intrusión marina | 77        |
| 6.12.2 Utilización conjunta de las aguas subterráneas y superficiales               | 79        |
| <b>7 RESULTADOS OBTENIDOS</b>   | <b>80</b> |
| <b>7.1 Acuíferos y aguas subterráneas</b>   | <b>80</b> |
| 7.1.1 Caracterización hidrogeológica de las diferentes formaciones geológicas       | 80        |
| 7.1.2 Pozos, sondeos y manantiales  | 83        |
| 7.1.3 Piezometría   | 84        |
| 7.1.4 Calidad de las aguas subterráneas - caracterización hidroquímica              | 86        |
| 7.1.5 Salinidad e intrusión marina  | 87        |
| 7.1.6 Resultados análisis isotópicas  | 88        |
| 7.1.7 Relaciones ríos-acuíferos   | 89        |
| 7.1.8 Evaluación de la recarga - infiltración eficaz                                | 89        |
| 7.1.9 Modelos matemáticos de flujo y de intrusión marina                            | 91        |
| 7.1.10 Recursos hídricos y reservas hídricas  | 91        |
| 7.1.11 Utilización de las aguas subterráneas  | 92        |
| 7.1.12 Vulnerabilidad   | 94        |
| <b>7.2 Aguas superficiales</b>  | <b>95</b> |
| 7.2.1 Régimen hidrológico y recursos hídricos                                       | 95        |
| 7.2.2 Utilización de las aguas superficiales  | 96        |
| 7.2.3 Modelos matemáticos lluvia-escorrentía  | 96        |
| <b>7.3 Agronomía - Edafología</b>   | <b>99</b> |
| 7.3.1 Resultado de la investigación edafológica e identificación de zonas           |           |

|  |            |
|--|------------|
| <b>potencialmente regables</b>   | <b>99</b>  |
| <b>7.3.2 Identificación de zonas con regadío actual</b>  | <b>99</b>  |
| <b>8 CANTIDADES EXPLOTABLES DE AGUA</b>  | <b>101</b> |
| <b>9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>  | <b>102</b> |
| <b>9.1 Resumen de datos generales y socio-económicos</b>   | <b>102</b> |
| <b>9.2 Clima</b>   | <b>104</b> |
| <b>9.3 Orografía, Hidrografía y Geomorfología</b>  | <b>105</b> |
| <b>9.4 Geología y tectónica</b>  | <b>106</b> |
| <b>9.4.1 Geología</b>  | <b>106</b> |
| <b>9.4.2 Tectónica</b>   | <b>106</b> |
| <b>9.5 Actividades preliminares, base de datos y SIG</b>   | <b>108</b> |
| <b>9.6 Actividades de campo y estudios</b>   | <b>110</b> |
| <b>9.6.1 Monitoreo piezométrico y actividades relacionadas</b>   | <b>110</b> |
| <b>9.6.2 Monitoreo de calidad</b>  | <b>111</b> |
| <b>9.6.3 Monitoreos especiales (isótopos, aguas minero-medicinales, potabilidad)</b>                       | <b>111</b> |
| <b>9.6.4 Control de la salinidad y de la intrusión marina</b>  | <b>111</b> |
| <b>9.6.5 Geofísica</b>   | <b>112</b> |
| <b>9.6.6 Perforación y ensayos de bombeo</b>   | <b>112</b> |
| <b>9.6.7 Integración de la red meteorológica existente</b>   | <b>114</b> |
| <b>9.6.8 Campañas de aforos directos e instalación regletas hidrométricas</b>                              | <b>115</b> |
| <b>9.6.9 Actividades agronómicas y edafológicas</b>  | <b>116</b> |
| <b>9.6.10 Evaluación de la utilización del agua - Balance hídrico</b>                                      | <b>117</b> |
| <b>9.6.11 Cartografía temática</b>   | <b>118</b> |
| <b>9.6.12 Modelización aguas subterráneas</b>  | <b>119</b> |
| <b>9.6.13 Modelización aguas superficiales</b>   | <b>120</b> |
| <b>9.7 Resultados obtenidos</b>  | <b>121</b> |
| <b>9.7.1 Caracterización hidrogeológica de las diferentes formaciones geológicas y acuíferos presentes</b> | <b>121</b> |
| <b>9.7.2 Pozos, sondeos y manantiales</b>  | <b>121</b> |
| <b>9.7.3 Piezometría</b>   | <b>122</b> |
| <b>9.7.4 Calidad de las aguas subterráneas y caracterización hidroquímica</b>                              | <b>123</b> |
| <b>9.7.5 Salinidad e intrusión marina</b>  | <b>124</b> |
| <b>9.7.6 Resultados análisis isotópicos</b>  | <b>124</b> |
| <b>9.7.7 Relaciones ríos-acuíferos</b>   | <b>125</b> |
| <b>9.7.8 Evaluación de la recarga - infiltración eficaz</b>  | <b>126</b> |
| <b>9.7.9 Vulnerabilidad</b>  | <b>127</b> |
| <b>9.7.10 Modelos matemáticos de flujo de las aguas subterráneas</b>                                       | <b>127</b> |
| <b>9.7.11 Recursos hídricos y reservas hídricas subterráneas</b>   | <b>128</b> |
| <b>9.7.12 Régimen hidrológico y recursos hídricos superficiales</b>  | <b>129</b> |
| <b>9.7.13 Identificación de zonas con regadío actual y potencialmente regables</b>                         | <b>-</b>   |

---

|   |            |
|---|------------|
| <b>Evaluación de las necesidades hídricas para el riego</b> | <b>130</b> |
| <b>9.7.14 Utilización de las aguas subterráneas</b>         | <b>131</b> |
| <b>9.7.15 Utilización de las aguas superficiales</b>        | <b>132</b> |
| <b>9.7.16 Modelos matemáticos lluvia-escorrentía</b>        | <b>133</b> |
| <b>9.7.17 Cantidades explotables de agua</b>                | <b>134</b> |
| <b>9.8 Recomendaciones</b>                                  | <b>135</b> |
| <b>FIGURAS</b>  | <b>141</b> |
| <b>TABLAS</b>   | <b>142</b> |

## 1 INTRODUCCIÓN

Este informe presenta las actividades, las elaboraciones y los resultados del proyecto Estudio Hidrogeológico Nacional en la zona denominada “Planicie de Azua”, 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° 16' 45" y 18° 37' 10" de Latitud Norte y entre 70° 31' 09" y 71° 02' 42" de Longitud Oeste, tiene una superficie de aproximadamente 1,092 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 amplio tratamiento 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 de 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 comprendida prácticamente al 100% en la provincia de Azua y comprende totalmente o parcialmente los municipios de Azua, Las Charcas, Las Yayas de Viajama, Sabana Yegua, Estebanía, Pueblo Viejo.

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

| <b>Municipio</b>     | <b>Habitantes</b> |
|----------------------|-------------------|
| Azua                 | 83,774            |
| Las Charcas          | 11,645            |
| Las Yayas de Viajama | 13,877            |
| Sabana Yegua         | 12,935            |
| Estebanía            | 7,450             |
| Pueblo Viejo         | 25,340            |

La población total de estos 6 municipios se estima hoy en 155,021 habitantes de los cuales el 44% viven en zonas rurales y el 56% en áreas urbanas. Se puede estimar además que la población que vive realmente en el área de estudio representa el 90% de la población total de los 6 municipios. Con este asunto se puede calcular que la población del área de estudio es de aproximadamente 139,520 habitantes de los cuales 61,390 viven en zonas rurales y 78,130 en áreas urbanas (el 51.1% son hombres y 48.9% mujeres).

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

| <b>Municipio</b>     | <b>% analfabeto</b> |
|----------------------|---------------------|
| Azua                 | 30.2                |
| Las Charcas          | 35.0                |
| Las Yayas de Viajama | 41.3                |
| Sabana Yegua         | 34.6                |
| Estebanía            | 35.8                |
| Pueblo Viejo         | 32.0                |

La tasa media de analfabetismo se calcula en un 32.5%.

La población económicamente activa representa el 31% 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                      | 4.3                     |
| Trabajador por propia cuenta            | 37.8                    |
| Trabajador servicio doméstico del hogar | 1.2                     |
| Trabajador asalariado                   | 47.3                    |

## Trabajador familiar no pagado

9.3

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  | 57.19                  |
| Servicios comunales, sociales y personales   | 13.37                  |
| Comercio y turismo   | 7.79                   |
| Industrias manufactureras  | 7.01                   |
| Construcción   | 4.69                   |
| Transporte y telecomunicaciones  | 3.93                   |
| Estab. financieros, seguros, bienes, inmuebles<br>y servicios prestados a las empresas | 1.01                   |
| Electricidad, gas y agua   | 0.57                   |
| Pesca  | 0.37                   |
| Explotación de minas y canteras  | 0.07                   |
| Otro   | 4.00                   |

Las actividades agrícolas son las más importantes del área, ocupando casi el 60% de la población ocupada. 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 prácticamente centros turísticos frecuentados por clientes internacionales en el área. El 7.79% indicado como indicador del área comercial-turística se debe esencialmente, entonces, a la componente comercial. Las actividades industriales, aunque sean reducidas, 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, las únicas producciones industriales son las relacionadas con la industria alimenticia (industrias privadas en Azua).

### **Área agrícola y ganadera**

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

Productos agrícolas: plátanos, hortalizas (tomates sobre todo), melones, cultivos mixtos.  
Productos ganaderos: esencialmente caprinos.

### **Área de la pesca**

No existe una actividad pesquera desarrollada y organizada a nivel industrial. Sólo existe la pesca de bajura con pocos barcos pequeños a distancias no muy grandes de la costa. El producto principal es el tiburón en la zona de Puerto Viejo.

### **Área turística**

El turismo no está muy desarrollado. En la costa existen solamente limitadas instalaciones turísticas que se dirigen al mercado interno en la costa al Este de Azua.

Por lo que atañe al turismo ambiental, no existen parques o ecoturismo en general.

### **Área minera / extractiva**

A parte de la extracción de material para la construcción, las actividades en esta área son prácticamente inexistentes.

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

La red de carreteras, es de calidad media en el área y no está muy desarrollada. Las carreteras principales (carretera Mella y carretera a San Juan), se encuentran generalmente en buen estado, a parte algunos puentes dañados por el Ciclón George en Septiembre de 1998 y todavía no todos reconstruidos.

En el área de estudio no se encuentran ni aeropuertos ni puertos.

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 es bueno, la cobertura celular no es total.

### 3 CLIMATOLOGÍA

Para el desarrollo del análisis de las características climáticas del área, se tomaron en consideración los datos básicos medidos en 5 estaciones, a saber en:

- 2 estaciones pluviométricas/gráficas del INDRHI (período 1961-1996);
- 1 estación climatológica del INDRHI (El Sisál, período 1967-1996);
- 2 estaciones climatológica de la ONAMET (Azua, 1931-1997 y Peralta período 1982-97);

Los datos climáticos básicos fueron facilitados en base temporal diaria 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 de la Planicie de Azua es de 722.8 mm, a nivel de estación los valores anuales medios oscilan entre 493 mm (El Sisál) y 1238 mm (Peralta, río Jura);
- 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 junio en Baní) 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 la cuenca alta del río Jura y, en términos generales, en la Cordillera Central; las más secas a lo largo de la costa del Mar Caribe y en particular cerca de El Sisál;
- 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 la Planicie de Azua (sectores de Azua y Baní incluida la estación de El Peñón) el coeficiente de variación CV de la lluvia total anual asume, en sentido estadístico, el mismo valor en toda el área, es decir CV = 0.240;
- la temperatura media del aire presenta, en las estaciones de El Sisál y de Azua, valores anuales que fluctúan entre 26 °C y 27 °C, la variación intranual de la temperatura media es alrededor de los 3 °C, y el período de mayores temperaturas corresponde a los

meses de julio a agosto y lo de mínima a los meses de diciembre-febrero;

- la evaporación promedio anual de tanque A medida en El Sisál llega hasta los 2740 mm, todos los meses presentan valores elevados, el menor es en febrero con aproximadamente 199 mm.
- la ecuación de Hergreaves-Samani ha sido elegida como método de referencia para evaluar la evapotranspiración potencial ETPo 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).
- el promedio anual de la ETPo en la zona hidrogeológica de la Planicie de Azua es alrededor de los 1730 mm, a nivel de estación los valores anuales medios oscilan entre 1714 mm (El Sisál) y 1758 mm (Azua);
- el balance entre la precipitación media anual y la ETPo (de Hergreaves-Samani) llega a encontrar las áreas más secas, donde se señala un déficit hídrico alrededor de todo el año, en las zonas costeras; en cambio, las áreas húmedas se encuentran en las zonas de sierra, ocurriendo los períodos húmedos largos en particular en la cuenca del río Jura.

#### 4 OROGRAFÍA , HIDROGRAFÍA Y GEOMORFOLOGÍA

La red hidrográfica se caracteriza de una manera muy distinta entre las áreas a E y al O de Azua.

Al E de Azua la mayoría de los ríos son nada más que arroyos y cañadas secos, y también el arroyo Hatillo (llegando por la carretera desde Baní, al límite oriental del área de estudio) y el río Grande (por los pueblos de Estebanía y Caracoles) - los ríos más importantes en el sector - son en realidad ríos efeméricos, con caudales prácticamente nulos por la mayoría del año.

Un sector particular es el que se encuentra al E de Azua hasta la carretera NS Estebanía-Caracoles, donde la red de drenaje es muy pobre, debido al hecho de que las lomas al E de Azua (tpl-qp'Mc) juegan el papel de barrera con respecto a los recursos hídricos superficiales. Estos últimos se dirigen hasta el E (río Grande) o hasta el O (río Vía - ver más adelante), antes de modificar sus direcciones hasta el S.

Al O de Azua, aparecen los 3 ríos Vía, Jura y Tábara, cada uno de los cuales tiene sus distintas peculiaridades.

El río Vía es estacional y tiene una importancia limitada a nivel regional; llega de las lomas al N de Azua y cruza el mismo pueblo, continuando en dirección S hasta el pueblo de Monte Río.

El río Jura se caracteriza al contrario por una extensión importante (desde El Najagual en la extremidad N del área cartografiada) y por ser perenne en su trecho superior, seco en el sector mediano al S del pueblo de La Altigracia y todavía hasta la carretera principal Azua-Barahona, y luego perenne nuevamente desde el área de Clavellinas por todo su trecho terminal. Este último trecho se coloca en un área de surgencias y en correspondencia de un aumento significativo de las formaciones de granulometría fina, lo que, junto con la entrada de aguas de retorno de riego, justifica su carácter perenne. La parte final del curso está condicionada por las lomas calcáreas de la Vigía, que separan la llanura del mar Caribe, así que su dirección se modifica de manera importante hasta el SO (sector al S del pueblo de Las Terrazas).

El río Tábara, el más occidental en el área de estudio, llega desde el sector de Las Yayas de Viajama, y, con dirección NS, sube a la llanura de Azua en proximidad del pueblo de Tábara Abajo, unos 2-3 Km más al O del Cruce del Quince en la carretera principal Azua-Barahona. Es un río cuyo régimen hidrológico está totalmente distorsionado por los efectos de los sistemas de canalización que llegan desde el río Yaque del Sur, desde entonces no puede ser clasificado como perenne, aunque nunca aparece seco en su trecho terminal. Más al S de Tábara Abajo, su dirección se modifica como NO-SE, llegando al mar Caribe en proximidad del río Jura. Es evidente también en este caso que las estructuras de nivel regional juegan un papel determinante en la influencia de la marcha del río.

La presencia del río Yaque del Sur en la extremidad NE del mapa hidrogeológico resulta marginal para el área de estudio, no revistiendo, sobre la base del contexto geoestructural local, un papel importante en la alimentación de los acuíferos de Azua.

Algunas pequeñas lagunas se encuentran a lo largo del límite con el mar Caribe, en proximidad de los pueblos Puerto Tortuguero y Monte río (al S y SE de Azua), al S de la Loma de la Vigía, y en parte del sector de Puerto Viejo, donde las formaciones geológicas (marisma - manglares en el mapa) se caracterizan por una litología fina predominantemente arcillosa. En términos generales, se trata de lagunas de pequeña extensión.

Entre los elementos morfológicos característicos del área los de mayor interés para las finalidades del trabajo están representados por la llanura aluvial costera de Azua, la más

extensa, y por las más orientales de Estebanía y El Hatillo.

Los limitados afloramientos de la formación Arroyo Seco presentes, en el interior de la llanura, al S de Sabana Yegua son indicativos de la presencia de una pequeña dorsal, parcialmente sepultada, que flanquea al curso del Arroyo Tábara desde Cerros de Tabacal hasta las cercanías de la población de Rosario.

Las zonas llanas orientales, distinguidas por la interposición del relieve calcáreo de Loma Vieja, resultan bien delimitadas por los altos relieves circundantes.

El gradiente morfológico de estas cuencas, decididamente superior respecto del de la llanura de Azua, es indicativo de un contexto pantanoso menos maduro, con transición, como hemos recordado anteriormente, a cuerpos de conoide actualmente inactivos, como lo testimonian los bordes de terraza al margen de los arroyos que se expanden en los valles en cuestión.

Otro elemento relevante está representado por el área de relieve moderado que caracteriza a toda la parte interna entre la Sierra de Martín García y la cadena montañosa septentrional; este alto morfológico, de formación reciente, determina de hecho la separación del valle de Azua respecto del Valle de San Juan, separación responsable de la desviación hacia el SO del cercano río Yaque del Sur, cuyos aluviones pueden observarse todavía hoy en algunas mesetas apicales en el interior de esta zona.

## 5 LINEAMIENTOS GEOLÓGICOS Y TECTÓNICOS

### 5.1 Geología

Los extensos depósitos cuaternarios recientes que forman la amplia llanura de Azua y las dos llanuras menores de Estebanía y El Hatillo están delimitados al NE por los relieves eocénicos del Grupo de Peralta y al SO por los terrenos calcáreos de la Sierra de Martín García.

Extensos afloramientos de formaciones terrígenas neogénicas, flanquean dichos relieves y afloran con continuidad en las zonas de lomas al NO de Sabana Yegua hasta el río Yaque del Sur. La llanura de Azua está caracterizada también por la presencia de una dorsal costera discontinua, desarrollada en el frente mar, con dirección SO-NE.

En detalle, los terrenos que afloran en el área de estudio son los siguientes:

#### **Secuencias terrígenas Cenozoicas**

Forman los relieves que delimitan la cuenca de Azua y se distinguen entre los terrígenos del Grupo de Peralta, ya descritos para la zona de Baní, y los calcáreos de la Formación de Neiba.

##### Grupo de Peralta (teo-to'FI)

Atribuido al Eoceno inferior, está constituido por rocas flyshoides arenáceo-siltíticas (*Formación de Peralta*) y secuencias calcáreas predominantemente en facies detrítica (*Formación Jura*) que en la secuencia sedimentaria pertenecen a formaciones distintas.

La formación calcárea no está presente con continuidad, y se observan afloramientos, además de los de la Sierra del Número, como ya está indicado en el comentario al mapa de la zona de Baní, también inmediatamente al N de la llanura de Estebanía y en la franja interna de la falla de compresión que separa, entre la Loma de Piedra y Peralta, los terrenos paleogénicos de los neogénicos.

##### *Formación de Neiba (teo-tmii'c)*

Formada por calizas de color claro, de micríticas a cristalinas, a pedernales, en sucesiones bien estratificadas con estratos de espesor decimétrico. Esta formación, atribuida al Eoceno, constituye la Sierra de Martín García, en el margen SO del área, y la Loma Vieja, que separa la llanura de El Hatillo de la de Estebanía.

#### **Depósitos neogénicos**

El área contiene una espesa secuencia sedimentaria neogénica que comienza con rocas de origen marino profundo y termina con terrenos de ambiente continental.

Cinco unidades estratigráficas están presentes en la cuenca de Azua:

##### *Formación Sombrero (tmii'c)*

Está constituida por calizas pelágicas, margas, calcarenitas y niveles reestructurados de material carbonático de mar poco profundo, cuyos espesores resultan ser superiores a los 500 metros.

Respecto de la facies típica de la formación, en la cual las margas representan la mayor parte de la secuencia, en esta área predominan las facies calcáreas.

Esta formación está atribuida al Mioceno inferior.

##### *Formación Trinchera (tmis'Mm)*

Los litotipos que la constituyen son predominantemente mudstone, siltitas y areniscas, con

conglomerados subordinados, alternados en sucesiones irregulares bien estratificadas. Los espesores que esta formación posee son del orden del millar de metros. Generalmente el contacto con la formación Sombrerito que se encuentra por debajo es de tipo concordante; la subunidad denominada *Membro Gajo Largo* representa la transición entre el depósito de fuerte componente carbonático del Sombrerito al depósito francamente terrígeno característico de esta formación.

#### *Formación Quita Coraza (tmis'Mm)*

Atribuida al Plioceno inferior, está constituida casi exclusivamente por siltitas masivas con escasas intercalaciones de delgados estratos arenáceos. Los espesores que alcanza varían entre 200 y 700 metros. El contacto con la formación Trinchera que se encuentra por debajo es de tipo transicional. Esta formación ha sido cartografiada junto con la formación Trinchera que se encuentra por encima.

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

Representa la formación estratigráficamente más alta entre las de ambiente marino. Su espesor es de alrededor de 700 metros 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. La base de esta formación, concordante con la que se encuentra por debajo Quita Coraza, está ubicada en correspondencia de la aparición de los primeros depósitos coralinos, sea en posición primaria que como sedimentos reelaborados. Esta formación constituye el depósito en un ambiente marino poco profundo y deltaico fluvial.

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

Conocida también como Formación Vía, representa la fase de cierre de la cuenca sedimentaria, y está en facies típicamente continental. Está constituida por guijarros, cantos en matriz fina, arenas, limos y arcillas, generalmente sueltos o con bajo grado de cementación. La parte basal, marcando la transición del ambiente marino al continental, está ubicada en correspondencia del techo de las rocas marinas estratigráficamente más elevadas.

#### **Vulcanitas cuaternarias**

Una reducida actividad volcánica reciente está testimoniada para las presencias del domo basáltico s.l. (**q'b**) de Loma El Mogote, intruido en los sedimentos pliocénicos del Arroyo Seco, y del edificio volcánico formado por rocas de quimismo intermedio (**tpl-qp'and**) que constituye la Loma La Piedra, en el extremos N del área.

#### **Depósitos cuaternarios**

La vasta llanura costera de Azua y las llanuras menores de Estebanía y El Hatillo están constituidas por depósitos de origen fluvial (**q'f**) representados en sucesiones de guijarros, arenas y arcillas. En la llanura de Azua los depósitos aluviales muestran, procediendo hacia la costa, un progresivo aumento tanto de los niveles francamente arcillosos como de la fracción fina en los horizontes mixtos.

Los espesores que tales coberturas alcanzan no se conocen hasta el día de hoy.

Depósitos aluviales están presentes también en la llanura de origen tectónico en proximidad de Los Toros y en la franja situada a los pies de la Sierra de Martín García.

Los depósitos aluviales a menudo se presentan como terrazas con formación, a veces, de

fracciones aisladas, como se puede observar frecuentemente en el ya mencionado sector ubicado a los pies de la Sierra de Martín García.

En algunos casos (Sabana de Villa Real al N de Sabana Yegua), los depósitos aluviales revisten como una cutícula superficial, con formas que recuerdan las de las mesetas que flanquean al río Ocoa en la cercana área de Baní, algunos relieves internos constituidos por los depósitos terrígenos, tanto marinos como continentales, del neogénico.

Situaciones análogas, pero por extensiones reducidas, se observan también en el trecho de carretera que va de Tábara Abajo a Quita Coraza.

En el área de estudio están presentes algunos cuerpos deposicionales de forma convexa que pueden remontarse a ambiente, aluvial y/o mixto, de conoide (**q'ab**).

También los sectores superiores de las llanuras de Estebanía y, en menor medida, de El Hatillo, aun habiendo sido clasificados como depósitos aluviales por falta de límites definidos, deberían ser considerados más plausiblemente o como conoides, parcialmente coalescentes, de bajo gradiente morfológico o como formas híbridas entre los dos tipos.

En la desembocadura del río Tábara se señala la presencia de dunas costeras (**q'd**), y de una amplia área palustre-lagunar (**qh'mr**), desarrollada entre la Loma de La Vigía y la Sierra de Martín García, extensamente colonizada por manglares.

## 5.2 Tectónica

El área en cuestión se inserta en el contexto tectónico regional que se caracteriza como un sistema de pliegues en el cual la tectónica neogénica ha reactivado las cuencas sinclinales en la forma de “Ramp Basin” sedimentarias, bordeadas, mediante fallas inversas, por relieves anticlinales.

Las estructuras plegadas que se observan en las unidades de relleno de estas cuencas, como la individualizada por el anticlinal de Quita Coraza, son una consecuencia directa del cierre progresivo de estas cuencas.

La situación tectónica de la zona de Azua está ulteriormente complicada por la presencia de una dorsal asísmica, conocida como Beata Ridge, cuya migración hacia el NE, provocando su internación en el Golfo de Azua, ha producido una rotación y una encorvadura de los principales elementos tectónicos presentes en las áreas involucradas por el fenómeno.

Esta situación está bien evidenciada tanto en las estructuras que caracterizan a la Sierra de Martín García y a la Loma de Vigía, como en el plegamiento del eje del anticlinal de Quita Coraza.

Al mismo contexto geodinámico parece posible atribuir la importante estructura transcurrente de transurrencia izquierda, que delimita en la parte N al Cerro de Los Cacheos.

La presencia de relieves alineados como la Loma de Vigía, Cerro Fermina y Cerro El Peñón es indicativa probablemente de un alto estructural, parcialmente sepultado, que podría constituir un hipotético divisorio de aguas entre la llanura costera de Azua y la adyacente llanura de Estebanía.

Otro elemento distintivo es el representado por el alto estructural y morfológico presente entre Sabana Yegua y el Río Yaque del Sur, límite NO del área estudiada, que determina la separación de la cuenca de Azua respecto del Valle de San Juan.

Tal levantamiento se realiza en una fase posterior al plegamiento como lo testimonia la presencia de depósitos aluviales recientes inalterados superpuestos a las secuencias plegadas de los terrenos neogénicos.

## 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 escorrentía 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 hidroclimática 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 de la Planicie de Azua**

#### **Modelo Matemático para el Acuífero de Azua**

TESIS DE GRADO, UASD, 1977

Es un trabajo de grado sustentado por bachilleres para optar al título de Ingeniero Civil en la Universidad Autónoma de Santo Domingo. En este trabajo los autores afirman que el acuífero de Azua presenta problemas de salinidad, notándose esto en el aumento de la concentración del ion cloruro. Otro aspecto que señalan es que la recarga natural que recibe el acuífero es del orden de los 40 millones m<sup>3</sup>/año y donde estiman que 11 millones m<sup>3</sup>/año fluyen subterráneamente hacia el mar.

La extracción de aguas subterráneas durante el período 1970-1971 fue del orden de 45 millones m<sup>3</sup>/año, lo cual significa una sobreexplotación de unos 16 millones m<sup>3</sup>.

#### **Aguas Subterráneas en el Valle de Azua**

ROBERT KULSTAD IAD,

Es un trabajo de investigación, el cual consiste en determinar las condiciones de las aguas subterráneas en el Valle de Azua. En este informe el autor afirma que la mayoría de los pozos se encuentran bajo presión artesiana, existiendo algunos con cierto desbordamiento y con problema de salinización. Indica además que el Valle es una cuenca estructural llena de arena, grava y limo. Las montañas que lo rodean son mayormente de calizas. Los yacimientos de arena, grava y limo en los costados de las montañas están inclinados hacia la parte baja del Valle. Pese a que las lluvias en el Valle de Azua son bajas (promedio anual 686.3 mm), la elevada porosidad y permeabilidad de las arenas y gravas indican un acuífero importante.

### 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.

#### **Crterios 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 de la Planicie de Azua).

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 la Planicie de Azua 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 69.

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

- el 35% de los puntos (24), eran aptos sólo para medidas piezométricas;
- el 16% de los puntos (11), eran aptos sólo para medidas de calidad de aguas;
- el 46% de los puntos (32), eran aptos para medidas piezométricas y de calidad de aguas al mismo tiempo.

Esto significa que:

- el 81% de los puntos inventariados (56), eran aptos para la red de control piezométrico;
- el 62% de los puntos inventariados (43), eran aptos para la red de control de calidad de aguas;

- solamente el 3% de los puntos (2), no eran aptos, en las condiciones en las cuales los encontramos, para ser incluidos en las redes de control.

La alta concentración de pozos utilizables en esta zona y el bajo número global de puntos inventariados para poder escoger las redes de control, se explica por el elevado conocimiento de la misma, del entonces responsable de Hidrogeología de la Oficina Regional Sur del INDRHI (Ing. Jesús Medina) que, incorporado como experto local en el proyecto por dos meses, participó activamente en las fases de inventario optimizando el trabajo.

Los pozos se concentran en dos zonas:

- . en la zona de Estebanía y Las Charcas;
- . entre la Loma de la Vigía, Azua, Sabana Yegua y Puerto Viejo.

En esta última zona se encuentran pozos con características artesianas.

Los pozos son utilizados sobre todo para riego y para uso doméstico. Los pozos de riego se concentran especialmente en la zona del proyecto Ysura y en el área de Las Charcas y Estebanía.

### **Problemas encontrados**

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

- la falta de energía que no permitió tomar muestras en algunos pozos;
- en muchos pozos no hay orificio para las medidas piezométricas;
- la gran cantidad de bombas existentes dañadas que impiden que se puedan tomar muestras de agua, o que se puedan medir niveles estáticos porque no se encuentran los encargados para abrir las casetas donde están la gran mayoría de los pozos.

### **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 157 (no existía en los términos de referencia una cantidad específica para esta unidad).

En la tabla 4.3/1, se ilustran los detalles relativos a las características de los puntos de agua considerados. Entre otros, podemos indicar lo que sigue:

- La mayoría de los puntos de aguas existentes están representados por pozos (el 68.2%). También los sondeos están bien representados totalizando el 31.8% de las cantidades globales.
- Entre los propietarios de los pozos, los más representados son los particulares (22.9%), INAPA (11.5%) y el INDRHI, cuyos pozos, incluyendo los realizados en el proyecto, representan el 22.3% de los inventariados. En 55 pozos (35.0%) no se pudo identificar al propietario.
- En los pozos que tienen equipos de bombeo, los tipos de bombas más representados son las de eje vertical (60%), las eléctricas sumergibles (21.5%), las diesel (6.2%) y las manuales (7.7%).
- Los pozos se utilizan principalmente para el riego (39.5%) y el uso doméstico (15.3%).
- Las cotas de los pozos varían entre 2 y 180 m. s.n.m.
- Solamente en el 5.7% 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 21.6 metros.
- El pH de las aguas se sitúa entre 6.7 y 8.7, con un promedio de 7.2.
- La temperatura de las aguas varía entre los 26.5 y los 32.0 grados Celsius con un promedio de 28.5 grados.

- 
- Con referencia al número total de medidas ejecutadas, la conductividad eléctrica supera los 500 microSiemens/cm en el 90.9% de los casos, los 1000 microSiemens/cm en el 25.5% de los casos y nunca los 2500 micrSiemens/cm.

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

Para la realización de la base de datos alfanumérica de manejo de los datos recopilados en el proyecto “ESTUDIO HIDROGEOLOGICO NACIONAL EN LA REPUBLICA 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:

- Isohipsas: 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 30 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 de la red “histórica” del INDRHI (para dar continuidad a las medidas) 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 66 puntos (820 medidas) de los cuales 64 (576 medidas) antes del huracán y 47 (137 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 63.6% del total considerado. En los últimos 3 meses se añadieron 2 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 (820 contra un número previsto de 510), fue superior de 310 a lo previsto (+60.8%).

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 éstos a nivel regional, se distinguieron las isopiezas principales de 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 sustitución/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.

Los puntos trigonométricos utilizados en este área fueron Vigía y Buey.

La utilización de un número tan exiguo de puntos 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 la Planicie de Azua, fue seleccionado 1 nuevo punto.

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 53 para la Planicie de Baní.

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 algunos casos específicos, donde era importante una determinación precisa de la elevación de cada punto.

Esta metodología de determinación de la cota se aplicó en 2 sondeos pertenecientes a puntos de control de la salinidad (intrusión marina), a fines de cálculo de la cota absoluta de la interfase agua dulce - agua salada y de su gradiente.

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. Las cotas absolutas se determinaron tomando como referencia la cota del mar en el punto más próximo al sondeo Estebanía 1 por falta, en la zona, de puntos de la red de nivelación nacional y de vértices trigonométricos nacionales.

Los puntos interesados por el levantamiento fueron:

| <i>Identificación del sondeo</i> | <i>Código del punto en el Banco de datos</i> |
|----------------------------------|--|
| Estebanía 1                      | 3899   |
| Estebanía 2                      | 3898   |

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

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

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 30/35 puntos, la variación del número se debe a la disponibilidad a veces esporádica de algunos 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;
- $\text{HNO}_3$  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 brigada 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 isotópicos**

En el curso del proyecto se han tomado un total de 4 muestras (Fig. 6.4.2/1). En todas las muestras tomadas se han determinado: Oxígeno-18 (O18), Deuterio (D) y Tritio (T), en una 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, 7 de las cuales dentro del área de Azua, 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 38 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 muestreados para esta investigación han sido los siguientes:

Parámetros microbiológicos

- Coliformes (Colibacilos totales)
- Coliformes fecales (Colibacilos fecales)
- Enterococos (Estreptococos 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 substancialmente ligadas al estado de la misma, es decir:

- Bomba in erogación continua. La muestra ha sido tomada directamente;
- Bomba instalada pero detenida. La 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  $\text{HNO}_3$  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 a la 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**

Por falta de manantiales no se extendió el estudio a ésta área.

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

Por lo que concierne a la red de control de la intrusión marina, son necesarios los siguientes requisitos:

- disposición a lo largo de directrices paralelas al la dirección de flujo;
- ausencia de equipos en el pozo que impidan el uso del instrumental de medición.
- características de realización del pozo adecuadas;
- accesibilidad;
- distancia relativa de los demás puntos de la red;

En este sector sólo 2 pozos han resultado idóneos para la ejecución de los perfiles verticales de salinidad.

Para la ejecución de los logs para la individualización de la interfase agua dulce agua salada se utilizó una sonda multiparamétrica Hydrolab DataSonde 4. La sonda estaba dotada de sensores para la determinación de:

profundidad (m,  $\pm 0,3$  m, de 0 a 200 m)  
conductividad eléctrica compensada a 25°C (mS/cm, 1%, de 0 a 100 mS/cm)  
temperatura (°C,  $\pm 0,01$  °C, de -5 a 50 °C)

Antes de comenzar cada perfil los operadores de campo seguían los procedimientos previstos por la empresa constructora para la verificación tanto de la calibración del instrumento como de la correcta funcionalidad de la parte electrónica.

Las mediciones se efectuaron en bajada respetando un tiempo mínimo de lectura de aproximadamente 1', para estabilizar el instrumento.

Los datos medidos se registraban tanto en el datalogger como en fichas apropiadas para garantizar la seguridad de la medición también en caso de avería del instrumento.

#### **Organización de los datos**

Los resultados de las actividades relativas a los perfiles de salinidad se organizaron en el banco de datos ilustrando:

- fecha;
- análisis de laboratorio;
- profundidad de la tabla de agua;
- temperatura del aire;
- temperatura del agua;
- conductividad eléctrica.

---

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

- red de control de la intrusión marina;
- n° de inventario del punto.

## 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.

El objetivo de la prospección en el área fue el estudio de la intrusión marina en la zona de Estebanía - Las Charcas

### 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 la Planicie de Azua fueron las siguientes:

|                                |    |           |
|--------------------------------|----|-----------|
| S.E.V. con AB = 150 m          | 17 |           |
| S.E.V. con AB = 500 m          | 25 |           |
| S.E.V. con AB = 1000 m         |    | 0         |
| <b>Total S.E.V. realizados</b> |    | <b>42</b> |

El trabajo se ejecutó en la primera de las dos campañas (ver párrafo siguiente), en el mes de Septiembre de 1998.

### 6.5.3 Metodologías de prospección y de interpretación utilizadas

#### Organización general de la prospección

La prospección geofísica fue realizada generalmente 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 esta área no fue necesaria una segunda campaña, dado que el trabajo llevado a cabo en la primera fue suficiente para los fines de la prospección.

#### 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:

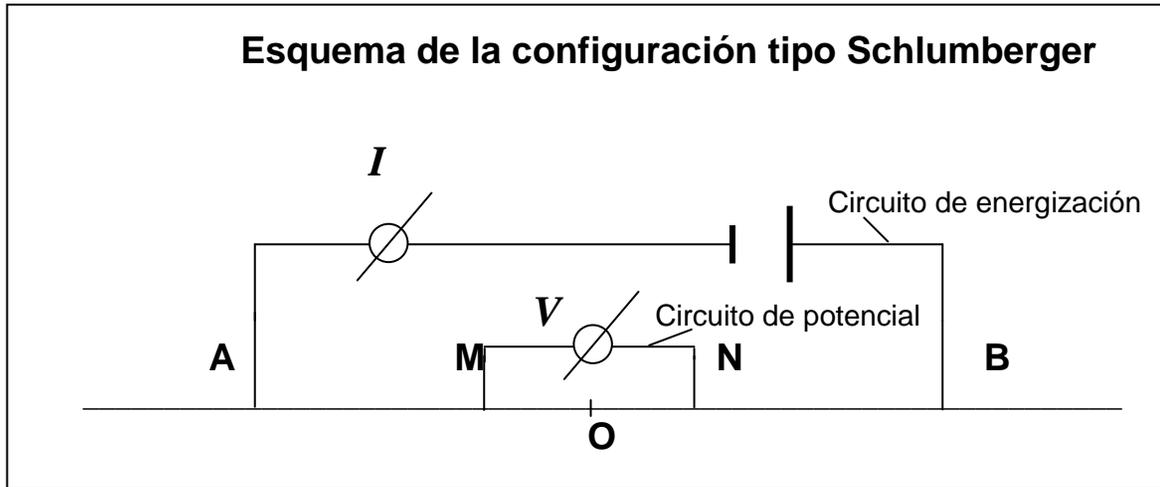
- La litología de las formaciones presentes.
- La presencia de agua (u otro fluido de imbibición).
- El contenido salino y la temperatura del agua.
- Los espesores y, de forma general, la geometría de las diferentes capas eléctricas en el subsuelo.

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 de 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  $\rho_a$ .

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 ( $\rho_a$ ) por cada posición sucesiva de los electrodos de corriente, se construye una curva que representa la función  $\rho_a = f(AB/2)$  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 fue 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  $\rho_a = f(AB/2)$  para diferentes modelos del subsuelo, cada uno constituido por diferentes capas de espesor definido y resistividad real  $\rho$ . 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 electroestratos. La elaboración de estas secciones particulares se realiza principalmente para obtener una mejor visión sobre la situación electroestratigráfica 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 (electroestratigráficas) 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 la Planicie de Azua:

- Realizar un embrión inicial de red de control de la intrusión marina.
- Servir de calibración para la interpretación de la geofísica.
- Adquirir datos relativos a los parámetros hidráulicos de los acuíferos (T, K, S).

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 éstos se realizaron en la Planicie de Azua:

- Sondeos entubados a aprox. 7”
  - de profundidad inferior a 75 m 2
  - de profundidad entre 75 y 150 m -
  - de profundidad entre 150 y 225 m -

|                                  |          |
|----------------------------------|----------|
| Sondeos entubados a aprox. 10”   | -        |
| - de profundidad inferior a 75 m | -        |
| Sondeos entubados a aprox. 12”   | -        |
| - de profundidad inferior a 75 m | -        |
| <b>Total</b>                     | <b>2</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 2 sondeos de exploración de la Planicie de Azua se ejecutaron utilizando, entre las tecnologías aplicadas en el País, la que mejor se adaptaba a las litologías esperadas y a la obtención de los datos requeridos.

Tomando en cuenta estos factores los 2 sondeos se realizaron con el método a rotación directa y circulación de lodo 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 ripios 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.

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

En el área se han realizado 6 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 han sido efectuadas a intervalos regulares, así que éstas 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. 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 tiene 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 del 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 4 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 El Cruce del Quince (Azua);
- en el mes de agosto del año 1999, consiguientemente a una variante de proyecto, se instalaron 3 estaciones ulteriores:
  - Estebanía, Peralta y Yayas de Viajama.

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 3 estaciones meteorológicas, se consideró también la oportunidad de integrar la red ya operativa para garantizar tanto un mejor control de áreas afectadas por particulares condiciones climáticas (por ejemplo el sector oriental de Estebanía), como la disponibilidad, en el futuro, de datos climáticos fiables y representativos a favor de la utilización de los modelos matemáticos lluvia-escorrentía calibrados en el ámbito del proyecto, Anexo Memorias n° 15 (cuencas de los ríos Jura, Tábara y medio Yaque del Sur).

- 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 Ortíz 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 sep.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 9 lugares idóneos, en particular 8 secciones en cauces naturales y 1 en canal de riego (canal YSURA), para efectuar medidas mensuales.

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 9 secciones de aforos de las cuales 1 relativas a canales de riego (canal Hernán Cortés).

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, 4 se instalaron en la Planicie de Azua, distribuidas en 2 estaciones, de las cuales, una perteneciente a la vieja red de control del INDRHI y una nueva.

En la tabla 6.8.2/1 se encuentran los nombres y los datos de ubicación de las 2 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 subterránea (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 execo 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 Jura y Tábara, 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, 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 características (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 la Planicie de Azua; 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. 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**.

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 14 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  
capacidad de campo  
sustancia orgáenica  
pH  
nitrógeno  
fósforo  
potasio  
carbonato de calcio  
capacidad de interscambio de cationes

**Ejecución de 120 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 7 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 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 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 agrícolas (se trata de superficies brutas, que comprenden taras como carreteras, caminos, canales, terrenos no cultivados), subdivididas en:
  - áreas agrícolas no regadías;
  - 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~~ 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 ~~excesos~~ 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 relevamiento 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:

- Clase 1** 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.
- Clase 2** 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.
- Clase 3** 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.
- Clase 4** 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.
- Clase 5** 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.
- Clase 6** 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, 10 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 los meses de enero y 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 enero - septiembre se midieron 5346271 m<sup>3</sup> para uso de riego (INDRHI) y 4336419 m<sup>3</sup> para uso domestico (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 substancialmente 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. Aunque no concerniese estrictamente al tema del balance hídrico, se han relevado también aquéllas situaciones críticas desde el punto de vista cualitativo, con particular referencia a las áreas costeras y a los fenómenos de

intrusión salina en acto.

### 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 solicitud 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 se ha preparado una cartografía hidrogeológica en escala 1:50.000 (Mapa 9/3 para la Planicie de Azua) 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 9/4). Los sectores cubiertos por la evaluación DRASTIC corresponden a las planicies costeras de Azua, Estebanía y Hatillo, al estrecho valle mediano del río Tábara y a la planicie interna de Los Toros.

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.

En consideración del hecho de que la cartografía de vulnerabilidad constituye un instrumento de planificación territorial, las limitaciones areales impuestas por la no

disponibilidad de algunos de los factores DRASTIC, aun excluyendo sectores también amplios de la entera área de estudio, hacen que tal exclusión sea “indolora”, estando dichos sectores constituidos principalmente por relieves inaccesibles y escasamente poblados, para los cuales no parece razonable imaginar alguna forma de desarrollo en tiempos cercanos.

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               |

En el caso del sector meridional de la planicie de Azua, donde el acuífero local resulta estar

confinado por una cobertura impermeable variadamente articulada, la simplificación del modelo local se realizó considerando un solo acuicludo superficial al cual se le atribuyó un espesor generalizado superior a los 30 m.

### **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).

Siendo las precipitaciones más bien uniformes en el área de interés, el factor litológico/formacional es el que determina la variabilidad local de la infiltración eficaz, que resulta de todos modos contenida, generalmente comprendida entre 60 y 160 mm/año, con los valores más elevados de pertinencia de la franja de los depósitos aluviales recientes de los ríos Tábara y Jura.

Del intervalo anterior se aleja el sector ubicado por arriba de Puerto Tortuguero para el cual el valor de recarga estimado determina la atribución a la clase con puntaje inferior.

Obviamente al sector de la planicie de Azua donde el acuífero resulta confinado se le asignó un valor de recarga igual a 0.

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 este sentido al conjunto de los depósitos aluviales del área de estudio, en consideración también de los criterios adoptados para las otras zonas y habiendo verificado un componente pelítico consistente en las estratigrafías disponibles para la zona, se le asignó un valor generalizado igual a 6, en adherencia con las atribuciones típicas para arenas y guijarros con apreciable componente fino.

A los pocos afloramientos calcáreos, que pueden remontarse a una facies atípica de la Formación neogénica “Sombbrero”, que constituyen algunos modestos niveles aislados en proximidad de Puerto Tortuguero, se les asignó un puntaje igual a 6, valor habitual para acuíferos calcáreos, calcáreo-margosos estratificados.

Un puntaje reducido a 4 se les asignó en cambio a las lomas, constituidas por sedimentos terrígenos neogénicos parcialmente litificados (Formación Arroyo Seco), que emergen en la planicie aluvial de Azua.

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

| <i>Tipo de acuífero</i>                          | <i>Puntajes</i> |
|--|-----------------|
| Calizas, calizas margosas neogénicas (Sombbrero) | 6               |
| Depósitos aluviales                              | 6               |
| Sedimentos terrígenos neogénicos(Arroyo Seco)    | 4               |

### **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).

La clasificación textural logra cubrir casi por entero al área sometida a la evaluación de vulnerabilidad. En los sectores no determinados se procedió, compatiblemente con las observaciones hechas en el terreno, con la conformación morfológica de las áreas y con la naturaleza de los litotipos que afloran, a la simple extrapolación a partir de las clases texturales adyacentes.

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 standards, 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 standards del método DRASTIC, en el sector considerado se asignaron los siguientes puntajes:

| <i>Litología del no saturado</i>                    | <i>Puntajes</i> |
|---|-----------------|
| Arenas y guijarros                                  | 8               |
| Arenas y guijarros con matriz y/o niveles pelíticos | 3-5-6           |
| Calizas, calizas margosas neogénicas (Sombrerito)   | 5               |
| Sedimentos terrígenos neogénicos (Arroyo Seco)      | 4               |

Sobre la base de las estratigrafías de los numerosos sondeos realizados por el INDRHI dentro del área de estudio, los depósitos aluviales cuaternarios, predominantes en los sectores sometidos a evaluación de vulnerabilidad, se interpretaron de manera diferenciada en función de la consistencia del componente pelítico, sea bajo la forma de niveles distinguidos que como porcentaje en la matriz; el valor más elevado (8) se atribuyó solamente a la planicie de Estebanía, mientras que a las sucesiones en el no saturado predominantemente finas, como en la parte interna de El Hatillo y entre Estebanía y Azua, se consideró más congruo atribuir el valor 3, con valores iguales a 5-6 en los otros sectores de las planicies aluviales. Sólo en los trechos de confinamiento del acuífero se asignó un valor igual a 1.

A las formaciones precuaternarias se les asignaron los valores 5 (Formación calcárea, calcáreo-margosa Sombrerito) y 4 (Formación terrígena continental Arroyo Seco).

**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  $7 \cdot 10^{-5}$  y  $9 \cdot 10^{-4}$  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 (karstismo, fracturación, granulometría, abundancia de la matriz en terrenos sueltos, etc.).

En el caso específico del sector de estudio A los acuíferos aluviales del área se les asignó un puntaje generalizado igual a 6.

Para los términos litoides neogénicos, tanto calcáreo margosos como terrígenos, las usuales condiciones de permeabilidad de las litofacies consideradas hacen que sea plausible asignar un puntaje igual a 2.

La síntesis de los puntajes atribuidos es la siguiente:

| <i>Facies acuíferas</i>                          | <i>Puntajes</i> |
|--|-----------------|
| Depósitos aluviales                              | 6               |
| Calizas, calizas margosas neogénicas(Sombrerito) | 2               |
| Sedimentos terrígenos neogénicos (Arroyo Seco)   | 2               |

Los puntajes obtenidos para cada uno de los factores, permitieron la redacción del mapa de vulnerabilidad en escala 1:100000 (Mapa 10/3), en el cual, además de la clasificación en términos de clases de vulnerabilidad intrínseca, están indicados también los centros de peligro potencial censados en el área de estudio.

En las Fig. 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 la vulnerabilidad.

## 6.12 Modelización

### 6.12.1 Modelos matemáticos de flujo de las aguas subterráneas y de intrusión marina

Se realizó un modelo matemático bidimensional de flujo, mediante el código de cálculo de diferencias finitas Modflow, como cobertura del sector occidental de la Planicie de Azua, o bien de toda el área de llanura que se extiende al O del pueblo de Azua, hasta el sector costero de Puerto Viejo y los depósitos de conoide que bordean a la Sierra de García Martín.

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 carácter más bien general, en consideración de la indeterminación en los espesores del sistema acuífero y en la caracterización de los parámetros hidrogeológicos del sistema examinado. La actividad se concluyó 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 desde el límite N (no muy lejos de la carretera Azua – Barahona) hacia el S (línea de costa, sector de Puerto Viejo). Es una excepción el sector SE, caracterizado por afloramientos importantes, que separan a la Planicie del Mar Caribe y desvían el rumbo del curso del río Jura (de N-S a NE-SO); en tal sector, el sistema acuífero de la Planicie se reduce nuevamente de espesor hasta desaparecer. Por lo que atañe a las permeabilidades, en cambio, éstas van rápidamente disminuyendo hacia el S, en razón del pasaje de formaciones relativamente gruesas a predominantemente finas, limoso-arcillosas. Se alejan, por último, los depósitos aluviales recientes asociados a los cursos de agua del Tabara y del Jura. El sistema, en razón de las predominantes condiciones confinadas, fue esquematizado como confinado y las propiedades anteriormente mencionadas fueron imputadas a valores de transmisividad. Se puso en evidencia el papel de alimentación de los ríos Tabara y Jura en su trecho inicial, y el papel drenante, en cambio, del segundo en el trecho aguas abajo de la ciudad de Azua. Por lo que atañe a la recarga, se hizo referencia a los resultados del estudio hidrológico, adoptando substancialmente valores medianos para las formaciones más al N y para los depósitos aluviales recientes (río Tabara y río Jura) y valores nulos para las formaciones finas presentes en la parte meridional de la Planicie.

El modelo fue integrado con la individualización de las tomas para uso potable/industrial (campo pozos de Azua, y pozos para los distintos pueblos pequeños de la Planicie), mientras que no existen en cambio áreas de interés turístico. Por lo que atañe al sector agrícola, los cultivos son extensos pero con uso casi exclusivo de recursos superficiales (red de canales) en la parte superior. Se tuvo en cuenta en el modelo el efecto asociado de recarga por exceso de riego. En la parte meridional se consideró en cambio el pequeño porcentaje de tomas atribuibles al sector subterráneo y en particular las pérdidas de los pozos artesianos, que, en progresivas vías de abandono, resultan corresponsables de la extensión de los fenómenos de empantanamiento.

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 repesurización en el curso de los últimos años, pero de todas maneras no son suficientes para los fines de la modelización en transitorio.

Para las simulaciones de la intrusión marina, se ha utilizado el simulador numérico de reservorio TOUGH2 (Pruess, 1991; Pruess et al. 1999), código de cálculo 3D de diferencias finitas integrales, saturado/no saturado y densidad dependiente. Entre los módulos termodinámicos disponibles en TOUGH2, se ha elegido el módulo EWASG (Battistelli et al., 1997) que permite la simulación del flujo multifásico de mezclas constituidas por agua, cloruro de sodio y un gas no condensable, el aire para esta aplicación específica.

En el ámbito de la Planicie de Azua, se elaboró un modelo 2D en sección vertical por medio del código de cálculo TOUGH2. La sección elegida, ubicada en el la zona oriental del sector de Estebanía, se extiende con rumbo SSO-NNE desde la línea de costa hasta la posición estimada de la isopieza 100 m s.n.m., por una extensión de 6.6 km. El cuadro hidrogeológico reconstruido en el ámbito del presente proyecto, como así también los datos específicos relativos a la posición de la interfase agua dulce – agua salobre, ha permitido una calibración del modelo de intrusión marina sólo con referencia a la situación actual observada. El modelo calibrado ha sido utilizado para predecir la evolución futura del fenómeno tanto en la hipótesis de mantener las extracciones en el nivel actual como en la de aumentarlas progresivamente.

### **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 están distinguidas en 3 grupos principales. De estos grupos lo relativo a las formaciones porosas de características intermedias (de permeabilidad como de productividad), se articula en dos ulteriores divisiones, que toman en cuenta la complejidad del sistema acuífero principal y su distinción en un área típicamente freática de la artesianiana en el sector S de la llanura.

Las 3 formaciones principales son las siguientes:

- Porosas, sede de acuíferos de permeabilidad alta y muy productivos. En este grupo hemos clasificado los depósitos aluviales gruesos asociados con los trechos intermedios de los ríos Tábara y Jura.
- Porosas, sede de acuíferos de productividad importante y/o media, freáticos o confinados. Este grupo se refiere a la mayoría de los depósitos cuaternarios de la llanura desde Estebanía hasta el límite E del área de estudio y, sobre todo, de la llanura que al O de la ciudad de Azua se extiende hasta los pueblos de Barrero y Ranchero en la extremidad SO del mapa, y más al O todavía en el contacto entre las formaciones carbonáticas fisuradas de la Sierra García y las de baja permeabilidad (Tms'Mm) a lo largo de la carretera Azua-Barahona. Formaciones parecidas se encuentran en el sector NO en correspondencia de los pueblos de la Guanabana, Los Toros y Villa Tábara. En realidad, trátase de un grupo de características muy distintas, comprendiendo depósitos gruesos de conoide, como aluviones gruesos en condiciones hidrogeológicas típicamente freáticas, hasta depósitos de componente arcilloso o fino predominante importante, en condiciones típicamente confinadas. Es entonces un grupo deshomogéneo, con variaciones sin embargo importantes en términos de permeabilidades, y un único denominador común representado por las reales potencialidades e interés económico (como en las partes freáticas el interés se debe principalmente a las elevadas permeabilidades, en el sector confinado las condiciones de artesianismo favorecen una explotación sin necesidad de bombas y al mismo tiempo con caudales elevados en correspondencia de los horizontes productivos). Por estas razones, se necesita una distinción en 2 grupos:
  - Acuíferos de permeabilidad variable y permeabilidad media. Se trata de formaciones en condiciones generalmente freáticas o, sólo localmente, semifreáticas. Empezando desde el sector oriental, todos los depósitos de conoide (pueblos de Hatillo, de Los Quemados) y la llanura de Estebanía y Las Charcas, en áreas también

caracterizadas sea por cultivos que por explotación de las aguas subterráneas importantes (ver. Piezometría). En la llanura al O de la ciudad de Azua, todos los sectores lejos de la costa, donde las informaciones estratigráficas indican sedimentos gruesos hasta algunos kilómetros (2-3 Km) al S de la carretera principal Azua-Barahona. Una variación litológica importante y muy rápida marca el límite meridional de estas formaciones, generalmente caracterizadas por recursos hídricos subterráneos importantes, también por el efecto de recarga debido a los ríos Jura y Tábara. Más al O, los extensos depósitos que en Barrero, Ranchería, San Antonio se extienden hasta el límite con las formaciones carbonáticas y las de baja permeabilidad, se clasifican en este grupo más por sus potencialidades que por una cualquiera explotación real. Las permeabilidades son probablemente buenas, pero las condiciones topográficas (áreas de lomas, se elevan desde pocas decenas de metros hasta los 200-300 m - Barrero - y también hasta los 500 m más al O), probablemente las profundidades de las superficies piezométricas (faltan los datos para documentarlo) y la falta de recursos hídricos superficiales son tales que un desarrollo agrícola de las áreas es impracticable. Las áreas más al N (Los Toros y Villa Tábara) también caen en este grupo; las actividades agrícolas tienen un cierto interés y es probable que aguas subterráneas en cantidades apreciables lleguen desde las áreas montañosas inmediatamente al N (en pocos Kilómetros se encuentran cotas de más de 1000 metros).

- Acuíferos en condiciones confinadas y aparición de intercalaciones arcillosas de espesores de medios a muy importantes en proximidad de la costa. Se trata de una vasta área del sector occidental, que, desde algunos kilómetros al S de la carretera Azua-Barahona, se extiende hasta la línea de costa. Las características típicas (y bien documentadas después por las estratigrafías) indican la presencia de intercalaciones finas predominantemente arcillosas, cuya importancia aumenta rápidamente desde el N hacia el S, así que ya en los sectores de Pueblo Viejo-Rosario las arcillas son fuertemente predominantes. A pesar de que las intercalaciones finas son importantes o también predominantes, estas formaciones se clasifican en este grupo por tres razones principales: las intercalaciones gruesas son generalmente de elevada productividad, la recarga en el sector aguas arriba del área artesiana es importante (sea por los ríos que por las pérdidas desde los canales) y, considerando las características artesianas y la importancia de las actividades agrícolas, todo el sector es todavía hoy (después del desarrollo del sistema de canalización) de gran interés por lo que se refiere a los recursos hídricos subterráneos. Se recuerda que esta área se caracteriza hoy día por los grandes problemas de pérdidas desde el sistema acuífero hacia la superficie por medio de los pozos artesianos, muchos de los cuales abandonados después del desarrollo de la red de riego superficial. Al mismo tiempo, la mayor utilización de recursos superficiales, la disminución de la explotación de los acuíferos, las pérdidas de los canales y la consecuente alimentación adicional de los acuíferos, son todos fenómenos que contribuyen a la migración hacia el N del límite entre área artesiana y freática. Único elemento positivo entre los muchos negativos, relacionado con la subida generalizada de los niveles piezométricos, es el contraste a los fenómenos de intrusión de agua salobre, que aparecen mucho menos importantes hoy día que algunos años atrás. Lo que aparece claro es que una correcta política de utilización conjunta de los recursos superficiales y subterráneos es aquí, más que en cualquier otra área de estudio, de importancia fundamental.
- Porosas, sede de acuíferos locales y discontinuos, de permeabilidad moderada o baja, poco productivos. Se clasifican en este grupo la casi totalidad de las formaciones al N

(moladas continentales  $tpl-qp'Mc$  - areniscas, conglomerados, pero también intercalaciones finas de arcilla predominante) de la llanura principal de Azua-Pueblo Viejo, generalmente al N de la carretera principal Azua-Barahona. Estas formaciones se extienden hacia el N, en proximidad de la gran línea de superposición que las separa de las formaciones flyshoides ( $teo-tolm'FI$ ), de predominantes componentes finos (clasificadas como formaciones de baja permeabilidad - ver más adelante). Estas formaciones porosas se caracterizan por permeabilidades muy variables (desde términos conglomeráticos hasta intercalaciones arcillosas) y se las clasifica en este grupo sobre todo por la ausencia de recursos hídricos superficiales (que puedan jugar un papel alimentante). El área, muy extensa, resulta generalmente seca, prácticamente sin ninguna actividad de interés antrópico. No se puede excluir la existencia de recursos hídricos subterráneos apreciables, pero, comparadas con las áreas de llanura más al S, debe tratarse sin duda de un área con niveles piezométricos muy bajos (con respecto a las cotas de la superficie), discontinuos y con condiciones no optimales de recarga. Inmediatamente al E de la ciudad de Azua, en el sector entre Azua y Estebanía, la red hidrográfica superficial muy poco desarrollada, el área de alimentación aguas arriba muy limitada, considerando el papel de "alto estructural" que juegan las formaciones fisuradas con sus 300 m de cota ( $tmi'c$ ), justifican la atribución a este grupo.

Las formaciones fisuradas se caracterizan en esta área por prevalecientes calizas y margas, a lo largo de las formaciones porosas de interés. Siempre de acuerdo con la leyenda de referencia, se distinguen dos grupos en esta área:

- Fisuradas, sede de acuíferos extensos y productivos, de permeabilidad normalmente alta. En este grupo, se individualizan las calizas de la Sierra de Martín García ( $teo-tmi'c$ ), en el límite O del área de estudio, que juegan también el papel de divisorio con respecto al área de Neiba más al O. Desafortunadamente no se dispone de datos piezométricos, tratándose de un área montañosa, sin ningún interés económico o actividad antrópica. Solamente, considerando las direcciones de estratificación también de las formaciones cercanas, y los fuertes gradientes topográficos, se puede imaginar una alimentación apreciable a la llanura principal.
- Fisuradas, sede de acuíferos locales y discontinuos, de permeabilidad medio-baja. Hemos clasificado en este grupo las formaciones de la Loma de Vigía, en el límite S de la llanura de Azua, y sus pequeñas continuaciones hasta los pueblos de Puerto Tortuguero y Caracoles al ESE de Azua. En nuestra opinión, el papel que juega la Loma de la Vigía a nivel regional es de gran interés, considerando las modificaciones que impone a la marcha del curso del Jura (de una dirección NS a NE-SO) y también los fenómenos generales de empantanamiento del área de Pueblo Viejo-Las Terreras, debidos sin duda también a un efecto barrera para las aguas subterráneas. Muchos otros sectores se encuentran en el mapa con características litológicas parecidas, desde el límite oriental (en el límite con el área de Azua) y a lo largo de las grandes líneas de superposición en la parte N del área cartografiada. Se trata generalmente de formaciones con una importante presencia de intercalaciones arcillosas, en la mayoría de los casos pertenecientes al grupo del flysh ya cartografiado en el sector de Baní ( $teo-tolm'FI$ ). La presencia de rocas basálticas ( $q'b$ ) algunos kilómetros al O de Tábara Abajo, tiene importancia más geológica (en el sentido de apoyo a la reconstrucción de los fenómenos geológicos y tectónicos del área) que hidrogeológica; en cualquier caso estos basaltos están clasificados en este grupo, más que nada por analogía con los que se encuentran en el área más al ONO de San Juan.

El último grupo es relativo a:

- Formaciones de baja permeabilidad y sin acuíferos significativos, comprende todas las formaciones flyshoides en sus facies de granulometría prevalecientemente fina arcillosa (teo-tolm'FI) al N de las líneas de superposición tectónica; estas formaciones se encuentran desde el límite oriental, al N del pueblo de Hatillo y a cotas apenas mayores que las de Los Quemados, y luego se extienden desde el sector de Estebanía hasta el límite NO del área de estudio por más de 20 Km. Siempre en este grupo se clasifican los depósitos continentales prevalecientemente margosos (Tmis'Mm), presentes inmediatamente al N de Azua, y en el sector al O de la llanura principal de Azua-Pueblo Viejo, hasta el límite del mapa. Otro significado caracteriza los depósitos cuaternarios costeros, como los que se encuentran en proximidad del pueblo de Puerto Tortuguero en sectores arealmente muy limitados y probablemente de baja energía deposicional (q'f), y, sobre todo, los depósitos finos de tipo lagunar del sector de Pueblo Viejo (qh'mr). Para estos últimos, no se excluye que recursos hídricos subterráneos de buena calidad se puedan encontrar en profundidad, considerando que las formaciones porosas presentes inmediatamente al N están caracterizadas por acuíferos de pequeño espesor y bien confinados.

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 la transmisividad varía muy poco y presenta un valor medio de magnitud de  $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , con máximo de  $5.18 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  y mínimo de  $1.19 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ; trátase probablemente de valores representativo del área, no obstante las variaciones litológicas cartografiadas a lo largo del proyecto (véase el mapa hidrogeológico).

Los ensayos han sido realizados principalmente en las formaciones porosas de la llanura de Azua. En este sector existe una variación litológica importante, caracterizada por un gradual aumento de las intercalaciones finas hacia el Sur y la predominancia en este sector meridional de condiciones de confinamiento. Evidentemente, el hecho de que este fenómeno no aparezca tan evidente en los datos interpretados de T es interpretable a la luz de la existencia de horizontes gruesos y bien permeables, aunque de espesor pequeño, entre depósitos de limos y arcillas prevalentes.

Un único dato interpretado por la llanura de Estebanía (al E de la ciudad de Azua) indica un valor de T comparable con los medidos en las demás zonas.

### 7.1.2 Pozos, sondeos y manantiales

Un fenómeno importante es el que se registra en el sector del río Jura poco al S de la carretera Azua-Barahona; el río, seco desde La Altagracia, vuelve a ser un curso perenne por efecto de las surgencias que se encuentran a lo largo del límite de artesianismo.

Los pozos, principalmente para riego (excepto el campo pozos del pueblo de Azua), se concentran en las 2 áreas de llanura de Estebanía-El Hatillo, al E de la ciudad de Azua, y la de Azua-Pueblo Viejo, al O de la misma.

En el área Estebanía-El Hatillo, los pozos se encuentran en proximidad y al S de la carretera principal Baní-Azua. Perforados en un acuífero freático, tienen fuertes problemas de intrusión de agua salobre, en relación también con los caudales y los bajos niveles piezométricos.

En el área Azua-Pueblo Viejo, los pozos son numerosos y se caracterizan como artesianos (surgentes o no surgentes) en todo el sector S (ver el límite de artesianismo en el mapa), por causa de las generales condiciones confinadas del acuífero, y como perforados en capa libre en la parte N. Los pozos inventariados (y la mayoría de los existentes) se extienden hasta el límite con las formaciones cartografiadas como "porosas de baja

permeabilidad” al N de la carretera Azua-Barahona.

No se encuentran manantiales importantes en el interior del área de estudio, excepto el manantial La Furnia en proximidad del pueblo de Barrero (datos INAPA).

Otros manantiales de modesta entidad están indicados de todas maneras en los márgenes de los relieves calcáreos y flyshoides del área.

### 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 11/3 (ver Entrega final – Mapas – Mapas Piezométricos) y/o en el Mapa 9/3 (ver Entrega Final – Mapas – Mapas Hidrogeológicos)

Las piezometrías de las dos sub-áreas (Estebanía-Hatillo y llanura de Azua-Pueblo Viejo) resultan bien distintas. Los dos acuíferos están separados por una zona geomorfológicamente más elevada que hemos interpretado también como un divisorio de aguas subterráneas, inmediatamente al E de la ciudad de Azua.

#### **- Sector de Estebanía**

El sector E (llanura de Estebanía, ya que las informaciones disponibles en el sector de Hatillo no son suficientes para definir una piezometría) se caracteriza por:

- . gradientes elevados (orden de 30 por mil) inmediatamente aguas arriba del pueblo de Las Charcas (definidos con la utilización de un solo pozo ubicado entre los pueblos de Las Charcas y Los Quemados) y
- . un sector de cotas piezométricas muy bajas, inferiores a cero metros, al S de Estebanía - Las Charcas.

Se trata de un área crítica, en la cual la fuerte explotación de los recursos subterráneos está favoreciendo los fenómenos de intrusión de agua salada.

Las líneas de flujo se extienden desde el NE hacia el SO en los abanicos aluviales arriba del pueblo de Las Charcas, y desde el N hacia el S aguas arriba del pueblo de Estebanía.

#### **- Sector de Azua-Pueblo Viejo**

Este sector se caracteriza por gradientes piezométricos mucho más pequeños (orden de 5 por mil) y, comportamiento general a parte, también con una cierta dificultad interpretativa. Antes de todo, una línea divisoria de aguas subterráneas se individualiza, en nuestra opinión, según un alineamiento casi N-S y en correspondencia de algunas pequeñas lomas de litologías menos permeables (tpl-qp'Mc), desde el Cruce del Quince hacia el estuario del río Tábara. De ahí que una cierta independencia (o mejor dicho reducida dependencia) de las 2 sub-áreas caracteriza el cuadro general del sistema.

Siempre en términos generales, el sector alto de la llanura (más al N del límite de artesianismo indicado en el Mapa 9/3) presenta una interdependencia con los ríos Jura y Tábara por causa de los depósitos existentes relativamente gruesos. Por lo que se refiere al río Jura, la presencia de un trecho seco desde el pueblo de La Altagracia hasta el sector poco al S del puente de la carretera principal Azua-Barahona, indica que este río con todo su caudal alimenta el acuífero. En cualquier caso, el elemento de mayor interés es, sin duda, el papel que juega el gran sistema de canalización del área, sobre todo con sus pérdidas, ya bien conocidas en bibliografía como elemento importante en el balance general de las aguas subterráneas.

El sector al S de la línea de artesianismo presenta otras complejidades. En términos generales, la alimentación directa de los ríos y de los canales (o también el drenaje de los

mismos, considerando los altos niveles piezométricos) tiene que ser mucho más pequeña por causa de las formaciones arcillosas, y, sin duda, una influencia importante sobre el comportamiento piezométrico general es la que juega la barrera de la Loma de la Vigía en la extremidad S del área de estudio.

Las líneas de flujo se extienden desde el N-NO hacia el S-SE y - a pesar de la falta de datos - tienen que modificar sus direcciones según el curso del río Jura, inmediatamente al N de la Loma de la Vigía, ya que esta última juega el papel de barrera hidrológica a nivel regional.

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 3.3/1 se visualiza la distribución de los valores piezométricos máximos y mínimos a lo largo del año hidrológico.

Los mínimos se observan esencialmente alrededor del mes de Mayo (entre Abril y Agosto). Los máximos por otro lado tienen mayor frecuencia, bien evidente, en Septiembre y se sitúan esencialmente entre este mes y Octubre.

Las variaciones anuales son generalmente mayores de 1 m: las máximas observadas no superan los 2.5 m.

Más en detalle, desde el punto de vista de las variaciones piezométricas anuales se puede subdividir el área en tres zonas principales:

- Zona de Estebanía – Las Charcas.

Se observan variaciones entre 1.5 y 2 m, probablemente en relación con la explotación del acuífero concentrada en algunos períodos de riego.

- Zona de Pueblo Viejo – Puerto Viejo.

Se observan variaciones reducidas, inferiores a 1 m.

- En el área restante las variaciones superan constantemente 1 m con máximos del orden de 2.5 m.

Por lo que atañe a las variaciones de los niveles medios después de 1970, con los pocos datos históricos de que disponemos se puede observar que los niveles en general han subido (variaciones mayores de 50 cm) en el área al Oeste, Sur y Sur-Oeste de Azua. No se tienen datos para establecer las variaciones en el área de Estebanía – Las Charcas

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 1 m. Las cotas subieron en el 90.9% de los puntos con una variación en gran parte inferior a 1.2 m (en el 59.1% de los puntos)

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

En esta área los puntos aptos ilustrados en el Mapa 2/3 son en total 42. De éstos, el 57.1% (24 puntos) no tiene bombas instaladas: el restante 42.9% (18 puntos) está equipado con bombas.

La red de control escogida cuenta con 15 puntos, de los cuales 2 (13%) están dedicados solamente a la red y 13 (87%) son privados. Los puntos de la red sin bomba son 14 (93%) y con bomba instalada sólo 1 (7%).

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 mas arriba indicados: se concentran en los dos acuíferos principales (en la planicie al O-SO de Azua y en la Zona de Estebanía – Las Charcas).

#### **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.

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.

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 120 muestras

En esta área la red de control resulta estar constituida por 30/35 puntos, la variación del número se debe a la disponibilidad a veces esporádica de algunos 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:

aguas bicarbonato-alcálico-térrreas;  
aguas bicarbonato-alcálicas;  
aguas de elevado tenor de cloruros.

Las aguas bicarbonato-alcálico-térrreas, representativas de la recarga regional, resultan ser las más numerosas y homogéneamente distribuidas. Estas aguas tienen en general una salinidad medio-alta que ocasionalmente alcanza puntas de poco más de 1 g/l.

Las aguas bicarbonato-alcálicas aparecen de manera ocasional, pruebas de situaciones locales, cuya fenomenología no tiene comprobaciones a nivel de estructura hidrogeológica conocida. Se trata de aguas con contenido de sales disueltas de intermedio 0,5-0,6 g/l a elevado 2,5 g/l.

Por último se releva la presencia de aguas de elevado contenido de cloruros, que se localizan en el sector costero oriental del área. En general este tipo de aguas presentan salinidades de elevadas a muy elevadas, hasta 8 g/l. Considerando la ubicación de estos puntos, todos cercanos a la línea de costa, resulta evidente el aporte del componente marino. Sin embargo, queda poco clara la composición de partida del agua antes de la contaminación, composición que ve un componente clorurado-alcálico-térrreo no encontrado en los demás pozos examinados.

De la investigación específica sobre la calidad potable de las aguas subterráneas emerge cómo (véase Anexo 8) la utilización de las aguas subterráneas para fines potables está extremadamente desarrollada en el área, con sistemas de pozos que garantizan caudales de extracción también elevados, como en el caso de Azua.

En las mismas planicies de Hatillo y Estebanía se efectúa el aprovechamiento de las capas locales para la alimentación del acueducto.

En analogía con lo observado en el área de Bani, también para Azua la utilización de las aguas de capa se limita a los acuíferos de porosidad primaria presentes en las planicies costeras.

Por las condiciones geológicas, subsisten situaciones particularmente desfavorables para el hallazgo de aguas subterráneas, no sólo para fines potables, en correspondencia de los vastos afloramientos terrígenos neogénicos presentes en el sector NO del área, donde, por otro lado, las instalaciones locales son extremadamente reducidas.

Relativamente al aspecto cualitativo, en el sector oriental están presentes amplias zonas de comprometimiento de las capas acuíferas, mientras que las aguas subterráneas mantienen una calidad aceptable, salvo intermitentes y esporádicos ascensos de la carga salina, en toda la planicie de Azua.

Los problemas principales se individualizan tanto en las cercanías de la población de Azua como en las planicies costeras de Estebanía y Hatillo.

El entorno de Azua resulta estar comprometido en numerosos puntos hídricos, y se caracteriza por anomalías derivadas de altos contenidos de sulfatos y, subordinadamente, por elevadas, pero no persistentes, cargas salinas.

En las planicies de Hatillo y Estebanía, a los inaceptables contenidos de sulfatos relevados en los puntos muestreados para la potabilidad se sobreponen, en las cercanías de la costa, los efectos de la contaminación con agua marina.

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

Para obviar a la escasez de puntos idóneos para la ejecución de los perfiles verticales de

salinidad, en las zonas costeras de proyecto el análisis a los fines de la individualización del fenómeno de la intrusión marina se extendió a todos los puntos de la red de control de la calidad. Para alcanzar el objetivo se llevó a cabo un análisis del contenido de cloruros relevado en todas las 1268 muestras analizadas, seleccionando punto por punto aquella con el tenor más elevado. La clasificación presentada en el Mapa de la intrusión marina (Mapa 5) fue elaborada sobre la base de una escala subdividida en cuatro clases:

$Cl \leq 100 \text{ mg/l}$ ;  
 $100 \text{ mg/l} < Cl < 250 \text{ mg/l}$ ;  
 $250 \text{ mg/l} < Cl < 1000 \text{ mg/l}$   
 $Cl \geq 1000 \text{ mg/l}$ .

Las clases propuestas se definieron en función de los siguientes objetivos:

- Caracterizar las aguas inalteradas;
- Poner en evidencia la evolución de las aguas, quedando en el interior de los límites de potabilidad válidos en la República Dominicana;
- Poner en evidencia los procesos de comprometimiento en acto;
- Poner en evidencia los comprometimientos irreversibles.

Por último se analizaron los perfiles verticales de salinidad efectuados para la evaluación tridimensional del fenómeno.

En la zona están disponibles dos perfiles: el más cercano a la línea de costa pone en evidencia la completa alteración del acuífero dados los valores muy elevados y constantes presentes ya desde la superficie piezométrica; el perfil ubicado más al interior en cambio hasta la profundidad investigada, 55 m, presenta valores normales. Disponiendo de una sola lectura es posible formular la hipótesis de una situación inicial de comprometimiento de los acuíferos.

Sobre la base de los criterios arriba expuestos, la distribución de los cloruros en esta área (Mapa 5) pone en evidencia el grave fenómeno de salinización de las aguas subterráneas, sintetizado en la figura 7.1.5/1 en la cual se distinguen las áreas con comprometimiento en acto de aquellas que corren potencialmente el riesgo de comprometimiento.

Del mapa de la intrusión marina (Mapa 5) se deduce que el sector oriental del área, Estebanía, resulta estar gravemente comprometido: tenores de cloruros elevados en la zona que da a la costa; interfase medida a profundidades comprendidas entre -50 y -60 m sobre el nivel del mar.

En el sector occidental del área el tenor de cloruros, que resulta ser de todas maneras inferior a las 250 ppm, y la carga piezométrica, dan una indicación cualitativa relativamente tranquilizadora.

#### **7.1.6 Resultados análisis isotópicas**

La distribución de los puntos relativos a las muestras examinadas (Fig. 7.1.6/1) pone en evidencia una leve influencia del agua marina sobre las muestras de la zona, el fenómeno, en efecto, es poco evidente.

Le 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 Isotópicos e

hidrogeológicos en la región sudoeste 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 300 y los 600 metros.

El contenido de Tritio coloca a las muestras en el ámbito de la recarga anterior al pico registrado en 1961.

El único dato relativo a los isótopos del Carbono<sup>14</sup> resulta alterado por la presencia de consistentes cantidades de materia orgánica, la edad calculada según los distintos modelos propuestos por la literatura varía desde un mínimo de 1300 hasta un máximo de 11500 años. También en este caso, como en los casos anteriores, es plausible considerar que las aguas parecen más viejas de lo que son en realidad por causa del exceso de CO<sub>2</sub> procedente de la degradación de la materia orgánica más antigua.

### 7.1.7 Relaciones ríos-acuíferos

En la zona hidrológica, en analogía con la zona de Baní, la contribución directa a la escorrentía superficial es bastante omisible, el régimen hidrológico local es de tipo esporádico. Los ríos y arroyos juegan un papel de alimentación de los acuíferos y las aguas escurren en superficie, en condiciones de escorrentía natural, sólo en correspondencia de episodios pluviométricos importantes.

En particular, por lo que atañe al intercambio napa-río, se evidencia:

- río Jura: se caracteriza por ser perenne en su trecho superior (arriba de la zona hidrogeológica de interés), esporádico en el sector mediano (cerca del puente de la carretera Sánchez), debido al efecto conjunto del canal H. Cortés y de la recarga directa del sistema acuífero, y luego perenne desde el área de Las Clavellinas por todo su trecho terminal por el doble efecto de surgencias aguas arriba y de entrada de aguas de retorno de riego (caudal promedio alrededor de los 0.186 m<sup>3</sup>/s medido en la sección de aforo de Las Clavellinas en el período septiembre 97-agosto 98, período seco en sentido climático, véase Anexo Memorias n°2).
- río Tábara: es perenne en la cuenca alta, mientras que en la cuenca media y baja su régimen hidrológico está totalmente distorsionado por los efectos del sistema de canalización Ysura que llega desde el río Yaque del Sur (dique derivador de Villarpando). Desde entonces no puede ser clasificado como perenne en sentido natural, aunque nunca aparece seco en su trecho terminal a lo largo del cual se encuentra un incremento de caudal seguramente relacionado con la entrada de aguas de retorno de riego. Por eso no es posible llegar a una evaluación cuantitativa del intercambio napa-río.

### 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 9/3: Mapa hidrogeológico Planicie de Azua, tiene un área total de 1092.0 km<sup>2</sup>, una precipitación promedio anual de 722.8 mm y una evapotranspiración potencial de referencia alrededor de los 1730 mm.

Ésta se caracteriza, por lo que atañe a las áreas de recarga directa, por formaciones porosas (azul), de permeabilidad de alta (terrenos de aluvión de los ríos Tábara y Jura) a

baja, y por formaciones fisuradas (verde) con acuíferos de permeabilidad alta y medio-baja, las cuales, en conjunto, tienen una superficie de 819.2 km<sup>2</sup>, esto es el 75% de la superficie total.

En términos generales, las principales fuentes de las aguas subterráneas son:

- la recarga pluvial directa;
- la recarga por flujo de retorno de aguas de riego (exceso de riego) e infiltración en canales.

En conjunto, teniendo en cuenta las características morfológicas, hidrogeológicas e hidrológicas, han sido individuadas 16 sub-zonas homogéneas (véase cap. 6.8.3, Fig. 7.1.8./1 y Anexo Memorias n° 14).

Para evaluar la tasa de recarga pluvial directa se tomaron en cuenta los parámetros obtenidos del análisis de la marcha climática medida en las estaciones meteorológicas de El Sisál, El Naranjal, Azua, Estebanía y Hatillo Azua.

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): 42.92 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a;
- años secos (T=5 años): 51.04 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a;
- año medio: 76.39 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a;
- años húmedos (T=5 años): 96.42 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a;
- años húmedos (T=10 años): 114.38 \* 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 canales tomando en cuenta:

- una eficiencia total promedio de los sistemas de riego alrededor del 40%;
- el caudal de operación de los canales;
- los caudales mensuales de operación medidos en el período '91-'95 en el canal YSURA (caudal derivado en Villarpando y recibido en Tábara Abajo);

La recarga media anual resultó ser:

- canal Estebanía-Las Charcas (sub-zona 12, sector oeste): 1.00 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a;
- canal YSURA alto (sub-zonas 3 y 5): 3.94 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a;
- canal YSURA bajo (sub-zona 6): 20.10 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a;
- canal Hernán Cortés (sub-zonas 6 y 8 sectores este): 1.50 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a;

En conjunto la recarga media anual total en la zona hidrogeológica de interés alcanza el valor de 102.93 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a así repartido:

- recarga pluvial directa: 76.39 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a;

- recarga por exceso de riego:  $26.54 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ ;

### 7.1.9 Modelos matemáticos de flujo y de intrusión marina

El modelo de flujo, realizado a lo largo del proyecto, fue utilizado para la evaluación del impacto debido a un aumento de explotación del sistema hídrico subterráneo del orden de  $8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$  distribuida sobre una superficie total de poco menos de  $100 \text{ Km}^2$  al O de la ciudad de Azua. Trátase de un aumento importante en valores absolutos, pero sin embargo pequeño en comparación con los caudales de la red de riego superficial, que se caracteriza sólo en correspondencia del canal Ysura por caudales superiores a los  $250 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$  (sector de Tabara Abajo).

Los resultados de esta simulación evidencian una variación piezométrica muy fuerte; con máximos de casi 20 m en el sector N y progresivamente menores hacia el S (en dirección de Puerto Viejo). El efecto es extremadamente positivo en términos de disminución de las pérdidas desde el sistema subterráneo (también desde los pozos surgentes en vías de progresivo abandono) en el sector meridional. Como ya se recordó en distintas ocasiones, en efecto, se trata de un sector afectado por extensos fenómenos de inundación, con un enorme impacto sobre las tierras cultivables.

La simulación se encuadra por lo tanto en una óptica más amplia, o bien aquélla de suministrar informaciones útiles para un correcto manejo integrado de los recursos hídricos superficiales y subterráneos. Dejando firme la oportunidad de restablecer en el área el uso de recursos hídricos subterráneos y eventualmente el interés en extender hacia el E las áreas con suministro de aguas superficiales, el interés verdadero de la simulación debe buscarse en la evaluación cuantitativa de los impactos.

La sección considerada, ubicada en la zona este del sector de Estebanía, está caracterizada por extracciones elevadas utilizadas predominantemente para fines de riego, y por una piezometría que presenta valores inferiores a 1 m hasta una distancia de más de 3 km de la costa. La simulación del estado natural llevada a cabo sugiere que la intrusión marina afectaba inicialmente a una limitada franja costera, con una interfase agua dulce - agua salobre que se ahondaba rápidamente alejándose del mar.

La simulación de las extracciones efectuadas en los últimos 30 años con caudal total estimado aproximadamente igual a la recarga del acuífero, indica que estas extracciones han determinado el comprometimiento de la franja costera del sector de Estebanía.

Las simulaciones de la explotación futura del acuífero indican que un incremento de las extracciones llevará a una notable extensión de la zona costera contaminada por cloruros. También la prosecución de las extracciones con los ritmos actuales debería determinar, aunque con una progresión más lenta del fenómeno, la extensión de la zona afectada por la intrusión marina.

Se puede concluir que es aconsejable proveer a satisfacer parte de las necesidades actuales y todos los ulteriores consumos futuros utilizando aguas no extraídas del acuífero freático presente en el sector de Estebanía.

### 7.1.10 Recursos hídricos y reservas hídricas

El sistema acuífero subterráneo de la Planicie de Azua se caracteriza por una cierta riqueza

de recurso potencialmente aprovechable. La recarga directa por infiltración ha sido estimada en efecto en el ámbito del estudio hidrológico (anexo n° 14) en un valor total del orden de los  $76.4 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$  sobre una superficie total útil de  $819 \text{ km}^2$ , con referencia a un año promedio. Se trata de un valor muy superior respecto del utilizado en el ámbito de las actividades de modelización ( $13.9 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ ), simplemente porque estas últimas se limitan al sector de llanura al O del centro poblado de Azua, o bien están excluidos los sectores septentrionales (con datos reducidos o inexistentes y de interés económico decididamente menor) y el sector E de Estebanía, objeto de una modelización de los fenómenos de intrusión de la cuña salina en acto hoy día. 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  $42.9 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$  (-44% respecto de la referencia promedio anterior) se reduce significativamente.

A estos valores de recarga directa podemos agregar sin más contribuciones laterales de pertinencia de los depósitos de conoide que limitan al O los declives de la Sierra de García Martín y más en general las contribuciones de pertinencia de la Cordillera Central y de los depósitos sedimentarios de baja permeabilidad que limitan la llanura al N. Se trata de contribuciones estimadas tentativamente en alrededor de los  $1.7 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ , en el curso del proceso de modelización siempre sólo para el sector al O del centro poblado de Azua.

Por último el papel de los cursos de agua, el río Tábara y el río Jura al E; alimentantes en el tramo alto, cambian ambos a condiciones drenantes en el tramo terminal. En el caso particular del río Jura, el curso de agua desaparece sin más en correspondencia del tramo a caballo del puente de la carretera nacional Azua-Barahona, para reaparecer luego poco aguas abajo en correspondencia del sector en presión. No se dispone sin embargo de informaciones suficientes para una evaluación cuantitativa y los valores que pueden deducirse de las actividades de modelización de las aguas subterráneas son relativamente pequeños y de todos modos del todo preliminares.

Para concluir pues podemos sintetizar que la estimación de la recarga directa es en su conjunto representativa de la recarga total, menos algún punto en porcentaje. Obviamente, además de la referencia al año promedio (utilizado en el curso de las actividades de modelización de las aguas subterráneas) se debe tener 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 muy elevada. El centro urbano principal (Azua) está alimentado por pozos ubicados al O del mismo, 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; sólo los datos INAPA para el campo de pozos principal de Azua indicarían explotaciones consistentes de casi  $14 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ . Por analogía con lo observado también en otras áreas de estudio (ej. Valle de San Juan), podemos hipotetizar que dicha diferencia pueda ser imputable a un funcionamiento discontinuo de los pozos bajo examen.

El sector agrícola de todas maneras es el que juega en esta área el papel fundamental, con absoluta preponderancia de producciones regadas de hidroexigencia relativamente elevada.

En el sector de la planicie de Azua sensu stricto (sector al O de la ciudad homónima), se

distinguen netamente la parte septentrional caracterizada por un uso casi exclusivo de recursos superficiales (canal Ysura y sistemas de canalización derivados) del sector meridional (acuíferos en presión –para los cuales hágase referencia a la cartografía hidrogeológica – hasta la línea de costa). En la parte septentrional el uso de aguas superficiales implica una recarga por exceso de riego, que ha sido estimada en el orden de los  $26.5 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/año en el ámbito del estudio hidrológico. Al contrario, en la parte meridional del sector, se registra un uso combinado de aguas superficiales y subterráneas, por cuanto el porcentaje de pertinencia de estas últimas puede considerarse generalmente contenido. En este sector, debe en cambio tenerse en la debida cuenta la existencia de generalizados e importantes fenómenos de subida a través de los pozos artesianos abandonados, con consiguientes extensas inundaciones y de hecho pérdidas no controladas a cargo del sistema subterráneo. En este sector, se ha estimado, en el ámbito de las actividades de modelización, una pérdida total del orden de los  $14-15 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/año; se trata de un valor congruente por orden de magnitud con el suministrado por el estudio agronómico, considerando tanto la indeterminación del porcentaje de repartición entre aguas superficiales y subterráneas como la existencia de amplias áreas no cultivadas o abandonadas en el ámbito de las macro-áreas indicadas.

El sector al E de la ciudad de Azua, indicado también como sector de Estebanía, se caracteriza por producciones agrícolas relativamente extensas y una utilización casi exclusiva de aguas subterráneas. Se puede considerar este sector como totalmente aislado – en sentido hidrogeológico – de la planicie de Azua y evaluar pues por separado el balance en escala local. Los fenómenos de intrusión salina, que afligen al área, indican sin dudas la existencia de condiciones fuertemente críticas. El examen cruzado de las estimaciones de recarga (ref. estudio hidrológico) y de las estimaciones de las tomas (ref. estudio agronómico), retomadas luego en el ámbito de las actividades de modelización de los fenómenos de intrusión salina (ref. Modelización de las aguas subterráneas), sugieren en efecto que las tomas totales se pueden estimar como muy cercanas a la recarga total.

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 relativo a los contadores volumétricos instalados en el curso del proyecto, los cuales han puesto en evidencia una cierta diferencia respecto de los datos directos suministrados por INAPA (-40% / -50%).

En rápida síntesis, recordamos que los datos INAPA indicarían un aprovechamiento total del orden de los  $16 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/año, incluyendo también el sector E (Estebanía) y 2 fuentes superficiales de reducida entidad de todas maneras (río jura). Ya hemos comentado estas informaciones, observando que el valor aparece según nuestra opinión ampliamente sobreestimado, también sobre la base de los datos adquiridos a través de los contadores volumétricos de proyecto. 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  $6 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/año, se trata de pozos para uso casi exclusivamente agrícola, como valoración de la hipótesis según la cual la toma total atribuible a este sector es de entidad muy elevada. Obviamente, las estimaciones de campo y los datos adquiridos por los contadores volumétricos participan en la evaluación de las tomas totales, sobre todo por su función de control

cruzado respecto de las estimaciones indirectas.

#### **7.1.12 Vulnerabilidad**

Los resultados de la aplicación del método DRASTIC, reproducidos en el Mapa 10/3, delinean un cuadro de la vulnerabilidad local que puede detallarse de la siguiente manera.

La vulnerabilidad en el territorio examinado es en general medio-baja, con áreas relativamente más vulnerables a lo largo del río Tábara, en las estrechas franjas costeras de las planicies de Estebanía y El Hatillo, y en un sector circunscripto aguas abajo de Sabana Yegua.

Mientras que para las dos primeras áreas reviste un papel relevante la subyacencia de la napa en la diferenciación de la clase de pertenencia, el sector aguas abajo de Sabana Yegua refleja en cambio la textura local de los suelos que determina menores garantías de contención. Se remarca, sin embargo que, no obstante el salto de clase entre este sector y los adyacentes, la diferencia entre éstos, en términos de valores absolutos de los índices DRASTIC, no resulta particularmente marcada.

En la distribución de las clases de vulnerabilidad en el área, resalta por último la parte inferior de la planicie de Azua, donde las condiciones de confinamiento del acuífero, determinan un grado de protección local decididamente elevado.

Superponiendo al cuadro general de las vulnerabilidades, así como se lo definió aquí arriba, el censo de las actividades antrópicas de posible impacto sobre los acuíferos locales, no emerge la existencia de particulares situaciones críticas; en el sector estudiado, en efecto, las únicas actividades industriales, de todas maneras de bajo impacto, son las relacionadas con la industria alimenticia; de éstas la presente algunos kilómetros al S de Sabana Yegua es la única que se coloca en un contexto con riesgo relativamente mayor.

También las actividades relacionadas con el turismo resultan muy contenidas y tales que no acarrearán particular perjuicio a la calidad de los acuíferos locales.

Las principales actividades en el área de estudio son en cambio las vinculadas con los cultivos agrícolas, ampliamente desarrollados en el sector de vulnerabilidad muy baja en la Planicie de Azua.

El riesgo mayor podría residir en la existencia a pocos kilómetros al SE de Azua de una descarga de residuos domésticos cuyas potencialidades contaminadoras parecen estar sin embargo mitigadas por un contexto local de buena protección del acuífero.

## 7.2 Aguas superficiales

### 7.2.1 Régimen hidrológico y recursos hídricos

El régimen hidrológico de la Planicie de Azua se caracteriza de una manera muy distinta en las áreas al este y al oeste de la ciudad de Azua.

Al este de la ciudad de Azua, los ríos (por ej. el arroyo Hatillo y el río Grande, los ríos más importantes en el sector) son nada más que arroyos y cañadas secos y alimentan el acuífero. El río Grande, en particular, tiene un régimen hidrológico distorsionado por el efecto del canal Estebanía-Las Charcas, en su cuenca alta, aguas arriba del canal, el régimen es de tipo perenne mientras que aguas abajo, por efecto conjunto de la toma para riego y de la infiltración en la napa, hay escorrentía superficial sólo cuando ocurren episodios pluviométricos importantes (véase Anexo Memorias n° 13).

Al oeste de la ciudad de Azua, aparecen dos ríos importantes, el río Jura y el río Tábara:

- el río Jura se caracteriza por ser perenne en su trecho superior, arriba de la zona hidrogeológica de interés (el caudal natural promedio anual en El Carrizal es alrededor de los 2 m<sup>3</sup>/s, Tab. 7.2.1/1 y pár. 7.2.3), esporádico en el sector mediano (cerca del puente de la carretera Sánchez), debido al efecto conjunto del canal Hernán Cortés y de la recarga directa del sistema acuífero, y luego perenne desde el área de Las Clavellinas por todo su tramo terminal por el doble efecto de surgencias aguas arriba y de la entrada de aguas de retorno de riego. El afluente Arroyo Irabón está casi siempre seco debido también al aprovechamiento hídrico para fines de riego.
- el río Tábara es perenne en la cuenca alta (el caudal natural promedio anual en Tábara Abajo es de alrededor de los 0.8 m<sup>3</sup>/s, Tab. 7.2.1/1 y pár. 7.2.3), mientras que en la cuenca mediana y baja su régimen hidrológico está totalmente distorsionado por los efectos del sistema de canalización YSURA que llega desde el río Yaque del Sur; en su tramo terminal nunca aparece seco, hecho seguramente relacionado también con la entrada de aguas de retorno de riego.

Por lo que atañe a la identificación de la entidad promedio mensual de la escorrentía torrencial y del flujo base, no disponiendo de datos hidrológicos medidos suficientes y fidedignos, 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, con referencia a las cuencas altas:

- río Jura, una contribución media del flujo base alrededor del 57% de la escorrentía total (cv = 0.51);
- río Tábara, una contribución media del flujo base alrededor del 60% de la escorrentía total (cv = 0.64).

En conjunto los recursos hídricos superficiales potencialmente utilizables en la Planicie de Azua son limitados y de hecho se refieren sólo a los ríos Jura y Tábara y varían entre 43.2\*10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (año seco, T=10) y 90.2\*10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (año promedio).

### 7.2.2 Utilización de las aguas superficiales

La demanda de recurso hídrico superficial en la Planicie de Azua resulta (Tab. 7.1.11/1 y 7.2.2./1-2):

- para aprovechamiento urbano (aguas potables): caudal de explotación de alrededor de los 0.158 - 0.224 m<sup>3</sup>/s (INAPA), valores tales que no dan lugar a situaciones de posible criticidad; la única advertencia es que siendo la utilización de tipo hidropotable, es necesario garantizar la calidad del recurso hídrico utilizado;
- para riego: con referencia al sector comprendido entre la cuenca del río Tábara y el río Vía (Azua), la hidroexigencia neta está evaluada en aproximadamente 92\*10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (equivalente a una demanda bruta del orden de los 180 - 270\*10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, eficiencia global de riego entre 30 y 50%).

El elevado valor de la demanda bruta de agua para fines de riego está satisfecho sólo en parte, aproximadamente el 15-23%, por recursos procedentes del interior del área de Azua (canales de Tábara Arriba, río Tábara, Hernán Cortés e Irabón, cuenca del río Jura); la cobertura de la necesidad está asegurada por lo tanto por recursos exteriores a través del sistema YSURA alimentado por el río Yaque del Sur (toma de Villarpando).

El actual nivel de utilización de las aguas del río Jura resulta compatible con la oferta natural de la cuenca; tomas más elevadas no resultarían en cambio garantizadas por períodos temporales de dimensión significativa ya con referencia al año promedio; además implicarían una reducción de la escorrentía que alimenta el sistema acuífero con consiguiente alteración de los actuales equilibrios hidrogeológicos.

Por lo que atañe al río Tábara, mientras que en su tramo medio-bajo el régimen de la escorrentía está totalmente alterado por el canal YSURA, en la cuenca de montaña el actual nivel de las tomas resulta compatible con la oferta natural aun con referencia a años secos; sin embargo, análogamente al río Jura, un incremento de dichas tomas resultaría ciertamente crítico, en particular en años secos.

### 7.2.3 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 Jura en El Carrizal (vieja estación del INDRHI, código 462001), período 1983-1990 (8 años);
- río Tábara en Tábara Abajo (código 470001), período 1968-1994 (27 años).

Los resultados de la aplicación del modelo matemático están presentados de forma numérica y gráfica, para cada cuenca 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 Jura en El Carrizal (superficie = 112 km<sup>2</sup>):  
precipitación promedio = 1335 mm;

escorrentía total promedio = 593 mm ( $Q = 2.05 \text{ m}^3/\text{s}$ );  
valores del coeficiente de escorrentía (cociente entre escorrentía y lluvia) elevados y caracterizados por una discreta variabilidad temporal (med=0.42, máx=0.56, mín=0.23) que se refleja también en el valor asumido por el coeficiente de variación anual, valor igual a 0.47;  
régimen hidrológico de tipo torrencial aunque permanente ( $Q_{\text{mín}} = 0.068\text{-}0.556 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{300} = 0.146\text{-}1.031 \text{ m}^3/\text{s}$ );  
moderado valor porcentual del flujo base sobre la escorrentía total, en promedio del orden del 57% (máx=61.6%, mín=52.7%);  
significativa variabilidad temporal de los caudales de estiaje (cv de alrededor de 0.56-0.59 con referencia a los caudales  $Q_{365}\text{-}Q_{330}$ );  
reducida permanencia en el cauce de valores de la escorrentía de interés para los fines de la utilización (en promedio 178 días por año están caracterizados por valores del caudal natural inferiores a  $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ , valor cotejable con el caudal de operación máximo del canal Hernán Cortés, cuya toma está aguas abajo de la estación 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:  $Q = 0.89 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

período de retorno de 1 en 10 años:  $Q = 1.05 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

período de retorno de 1 en 5 años:  $Q = 1.28 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

años húmedos:

período de retorno de 1 en 5 años:  $Q = 2.71 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

período de retorno de 1 en 10 años:  $Q = 3.30 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

período de retorno de 1 en 20 años:  $Q = 3.88 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

- río Tábara en Tábara Abajo (superficie =  $157 \text{ km}^2$ ):

precipitación promedio = 809 mm;

escorrentía total promedio = 168 mm ( $Q = 0.81 \text{ m}^3/\text{s}$ );

valores del coeficiente de escorrentía (cociente entre escorrentía y lluvia) caracterizados por una elevada variabilidad temporal (med.0 0.20, máx = 0.39, mín = 0.09);

régimen hidrológico de tipo torrencial aunque permanente ( $Q_{\text{mín}} = 0.013\text{-}0.355 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{300} = 0.028\text{-}0.495 \text{ m}^3/\text{s}$ );

significativo valor porcentual del flujo base sobre la escorrentía total, en promedio del orden del 60% (máx 0 77.6%, mín = 49.1%);

elevada variabilidad temporal de los caudales de estiaje (cv de alrededor de 0.67-0.82 con referencia a los caudales  $Q_{365}\text{-}Q_{330}$ );

reducida permanencia en el cauce de valores de escorrentía de interés para fines de utilización (en promedio 214 días por año están caracterizados por valores del caudal natural reconstruido inferiores a  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  y 106 días por valores inferiores a  $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

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:  $Q = 0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

período de retorno de 1 en 10 años:  $Q = 0.32 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

período de retorno de 1 en 5 años:  $Q = 0.41 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

años húmedos:

---

|                                     |                                  |
|-------------------------------------|----------------------------------|
| período de retorno de 1 en 5 años:  | $Q = 1.12 \text{ m}^3/\text{s};$ |
| período de retorno de 1 en 10 años: | $Q = 1.46 \text{ m}^3/\text{s};$ |
| período de retorno de 1 en 20 años: | $Q = 1.82 \text{ m}^3/\text{s};$ |

## 7.3 Agronomía - Edafología

### 7.3.1 Resultado de la investigación edafológica ~~ey~~ identificación de zonas potencialmente regables

La Planicie de Azua está constituida por una serie de terrazas casi llanas que descienden hacia el mar, que forman una parte de la gran llanura costera del Caribe. Desde el punto de vista geomorfológico la planicie de Azua es el resultado del levantamiento en gradas y de la consecutiva redistribución de los materiales por obra de los agentes de erosión.

Desde el punto de vista de la texturas y de las velocidades de infiltración en la zona examinada prevalecen suelos de empaste intermedio y velocidades de infiltración intermedias.

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 de la Planicie de Azua, 1694 ~~ha~~ susceptibles al riego, de éstas, 1007 ~~caen en la tercera clase y~~ 687 ~~en la~~ cuarta ~~clase.~~

### 7.3.2 Identificación de zonas con regadío actual

Los cultivos predominantes en esta planicie resultan ser: plátano, guineo, tomate industrial, sorgo, maíz, frijoles, melón, maní, yuca, cebolla, berenjena y pimienta y en menor medida sandía, batata, papaya, tabaco, otras fructíferas y pastos tanto naturales como artificiales. El plátano y el guineo se encuentran casi por doquiera, así como las demás especies anuales resultan diseminadas en toda el área.

—La superficie total agrícola de la Planicie de Azua es igual a 29.543 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. ~~La superficie totale agricola della Valle de Neiba è pari a 58.363 ha; è opportuno ribadire che tale superficie è comprensiva di superfici brutas, che comprenden taras como carreteras, caminos, canales, terrenos no cultivados. Inoltre è stata delimitata secondo il criterio della prevalenza, essendo stato il rilevamento effettuato ad una scala di sintesi.~~

En el interior de esta superficie, se han individualizado 23.103 ha con regadíos, de las cuales 7.983 con aguas superficiales, 2.037 con aguas subterráneas y 13.083 con aguas mixtas, subterráneas y superficiales. ~~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.

| <b>Cultivos</b> | <b>DEM. NETA ANUAL(mm)</b> |
|-----------------|----------------------------|
| maíz            | 681,765                    |
| arroz           | 825,705                    |
| tomate          | 510,585                    |
| musáceas        | 1337,215                   |
| yuca            | 648,2                      |
| frijol          | 416,1                      |
| pastos          | 633,975                    |
| pimiento        | 706,83                     |
| guandul         | 474,405                    |
| fructíferas     | 1161,405                   |
| sorgo           | 701,895                    |
| cebollas        | 510,585                    |
| maní            | 575,54                     |
| berenjena       | 706,83                     |
| batata          | 416,1                      |
| molondrón       | 993,665                    |

## 8 CANTIDADES EXPLOTABLES DE AGUA

Con respecto a los recursos hídricos subterráneos, con referencia a los dos sectores que constituyen la Planicie, los resultados del análisis desarrollado ponen en evidencia cómo:

- en el sector occidental (al oeste de la ciudad de Azua) es de buen auspicio un incremento de las tomas para permitir una reducción de los niveles piezométricos actuales. El efecto positivo que se entendería conseguir es una reducción de las áreas sujetas a empantanamiento en la zona meridional de Puerto Viejo-Pueblo Viejo. Tal incremento de las tomas concurriría también a liberar recursos superficiales del sistema YSURA para acarrearlos hacia el sector oriental (Estebanía) como alternativa a las locales tomas subterráneas. Además un mejoramiento de la eficiencia global de riego, concurriría a su vez a una benéfica reducción de los impactos consiguientes a los recientes fenómenos de represurización de los sistemas acuíferos locales.
- en el sector oriental (Estebanía), la situación actual es extremadamente crítica con tomas para fines de riego comparables con la recarga natural. La modelización de la intrusión marina ha confirmado la criticidad de la situación actual poniendo en evidencia también que los fenómenos de migración de la interfase agua dulce-agua salobre están probablemente aún en acto. En dicha área sería de buen auspicio por lo tanto una significativa reducción de las tomas (por lo menos de 50%) para permitir la detención de los procesos de intrusión marina en curso, o bien posiblemente su inversión.

Con respecto a los recursos hídricos superficiales, con referencia a los dos sectores que constituyen la Planicie, los resultados del análisis desarrollado ponen en evidencia cómo:

- en el sector occidental (ríos Tábara y Jura) no pueden proponerse ulteriores utilizaciones del recurso local en cuanto para el río Jura no resultarían garantizadas por períodos temporales de dimensión significativa y además implicarían una reducción de la escorrentía que alimenta el sistema acuífero con consiguiente alteración de los actuales equilibrios hidrogeológicos, mientras que para el río Tábara (cuenca alta) resultarían ciertamente críticas, en particular en años secos.
- en el sector oriental (Estebanía), de hecho careciente de recursos superficiales significativos, la reducción de las tomas que sería de buen auspicio podría ser cubierta por los recursos superficiales del sistema YSURA a través de un incremento de las tomas de aguas subterráneas en el sector occidental y/o un leve mejoramiento, del orden del 1.5-2%, de la actual eficiencia global de riego. Además, la consiguiente reducción en el sector occidental, de la recarga por flujo de retorno de aguas de riego (exceso de riego) e infiltración en canales, que puede estimarse en aproximadamente  $1.0 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a, contribuiría ulteriormente a mejorar la situación del nivel piezométrico haciéndolo descender, desde el momento que actualmente es excesivo.

## 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 9.1 Resumen de datos generales y socio-económicos

El área de estudio (ver Fig. 1/1) está comprendida entre 18° 16' 45" y 18° 37' 10" de Latitud Norte y entre 70° 31' 09" y 71° 02' 42" de Longitud Oeste y tiene una superficie de aproximadamente 1,092 Km<sup>2</sup>.

La zona estudiada está comprendida a 100% en la provincia de Azua y comprende totalmente o parcialmente los municipios de Azua, las Charcas, Las Yayas de Viajama, Sabana Yegua, Estebanía y Pueblo Viejo.

La población de los 6 municipios que vive en el área de estudio se estima hoy a 139,520 habitantes de los cuales 61,390 (44%) viven en zonas rurales y 78,130 (56%) en áreas urbanas. De estos, el 51.1% son hombres y el 48.9% mujeres.

La tasa media de analfabetismo se calcula en un 32.5%. La población económicamente activa representa el 31.0 % de la población total. La mayoría son trabajadores asalariados (47.3%) y trabajadores por propia cuenta (37.8%).

Los sectores que más contribuyen a la economía y que son las mayores fuentes de empleo son, en orden de importancia la agricultura (57.19%), los servicios (13.37%) y el comercio (7.79%).

En el territorio incluido en el área del proyecto, las únicas producciones industriales son las relacionadas con la industria alimentaria (industrias privadas en Azua).

Los principales productos agrícolas son: plátanos, hortalizas (tomates sobretodo), melones, cultivos mixtos. Los productos ganaderos son constituidos esencialmente por caprinos.

No existe una actividad pesquera desarrollada y organizada a nivel industrial. Sólo existe la pesca de bajura con pocos barcos pequeños a distancias no muy grandes de la costa. El producto principal es el tiburón en la zona de Puerto Viejo.

El turismo no está desarrollado. En la costa existen solamente limitadas instalaciones turísticas que se dirigen al mercado interno en la costa al Este de Azua.

Por lo que atañe al turismo ambiental, no existen parques o ecoturismo en general.

A parte la extracción de material para la construcción, las actividades en esta área son prácticamente inexistentes.

La red de carreteras, es de calidad media en el área y no está muy desarrollada. Las carreteras principales (carretera Mella y carretera a San Juan), se encuentran generalmente en buen estado, a parte algunos puentes dañados por el Ciclón George en Septiembre de 1998 y todavía no todos reconstruidos.

En el área de estudio no se encuentran ni aeropuertos ni puertos.

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 es bueno, la cobertura celular no es total.

## 9.2 Clima

Los datos climáticos del área hidrológica del proyecto fueron tomados de las estaciones meteorológicas del INDRHI (2 estaciones pluviométricas/gráficas, período 1961-1996 y 1 estación climatológica, período 1967-1996) y de la ONAMET (2 estaciones, Azua, período 1931-1997 y Peralta período 1982-97).

La característica principal del clima en las zonas costeras 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 de sierra, ocurriendo los períodos húmedos largos en particular en la cuenca alta del río Jura.

El promedio de lluvia anual de la zona hidrogeológica de la Planicie es de 722.8 mm, a nivel de estación los valores anuales medios oscilan entre 493 mm (El Sisál) y 1238 mm (Peralta, río Jura).

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 junio en Baní) 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 la Planicie de Azua (sectores de Azua y Baní incluida la estación de El Peñón) el coeficiente de variación CV de la lluvia total anual asume, en sentido estadístico, el mismo valor en toda el área, es decir  $CV = 0.240$ .

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, en las estaciones de El Sisál y de Azua, valores anuales que fluctúan entre 26 °C y 27 °C, la variación intranual de la temperatura media es alrededor de los 3 °C, y 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 es de 1730 mm, a nivel de estación los valores anuales medios oscilan entre 1714 mm (El Sisál) y 1758 mm (Azua), mientras que la evaporación promedio anual de tanque A medida en El Sisál llega hasta los 2740 mm y todos los meses presentan valores elevados, el menor es en febrero con aproximadamente 199 mm.

Para mayores detalles, refiérase al cap. 3 y al Anexo Memorias n° 1.

### 9.3 Orografía, Hidrografía y Geomorfología

El área de estudio está constituida por el gran abanico aluvial de la planicie de Azua y por dos abanicos menores en la parte oriental, situados por debajo de los elevados relieves de la cordillera Central que limitan a esta área hacia el norte.

Las zonas llanas orientales, distinguidas por la interposición del relieve calcáreo de Loma Vieja, resultan bien delimitadas por los altos relieves circundantes.

El gradiente morfológico de estas cuencas, es decididamente superior respecto del de la llanura de Azua.

La parte interna entre la Sierra de Martín García y la cadena montañosa septentrional resulta en cambio levemente elevada. este alto morfológico, de formación reciente, determina de hecho la separación del valle de Azua respecto del Valle de San Juan, separación responsable de la desviación hacia el SO del cercano río Yaque del Sur, cuyos aluviones pueden observarse todavía hoy en algunas mesetas apicales en el interior de esta zona.

La red hidrográfica se caracteriza de una manera muy distinta entre las áreas a E y al O de Azua.

Al E de Azua la mayoría de los ríos son nada más que arroyos y cañadas secos,

Al O de Azua, aparecen los:

- río Vía
- río Jura
- río Tábara,

## 9.4 Geología y tectónica

### 9.4.1 Geología

Los extensos depósitos cuaternarios recientes que forman la amplia llanura de Azua y las dos llanuras menores de Estebania y de El Hatillo están delimitados al NE por los relieves eocénicos del Grupo de Peralta y al SO por los terrenos calcáreos de la Sierra de Martín García.

Extensos afloramientos de formaciones terrígenas neogénicas, flanquean dichos relieves y afloran con continuidad en la zonas de lomas al NO de Sabana Yegua hasta el Río Yaque del Sur. La llanura de Azua está caracterizada también por la presencia de una dorsal costera discontinua, desarrollada en el frente mar, con dirección SO-NE.

Los terrenos que afloran en el área de estudio son:

*Terrenos paleogénicos*, que forman los relieves que delimitan la cuenca de Azua, constituidos por las formaciones terrígenas del Grupo de Peralta y por los litotipos carbonáticos de la Formación de Neiba.

*Depósitos neogénicos*, que constituyen una espesa secuencia sedimentaria que comienza con rocas de origen marino profundo y termina con terrenos de ambiente continental. Las cinco unidades que los componen son la Formación Sombrerito (calizas pelágicas, margas, calcarenitas y niveles reestructurados de material carbonático de mar poco profundo), la Formación Trinchera (predominantemente mudstone, siltitas y areniscas, con conglomerados subordinados), la Formación Quita Coraza (siltitas masivas con escasas intercalaciones de delgados estratos arenáceos), la Formación Arroyo Blanco (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) y la Formación Arroyo Seco, en facies típicamente continental (guijarros, cantos en matriz fina, arenas, limos y arcillas, generalmente sueltos o con bajo grado de cementación), que representa la fase de cierre de la cuenca sedimentaria.

*Vulcanitas cuaternarias*, fruto de una reducida actividad volcánica reciente, constituidas por el domo basáltico s.l. de la Loma El Mogote y por el edificio volcánico de la Loma de la Piedra, formado por rocas de quimismo intermedio.

*Depósitos cuaternarios* que forman la vasta llanura costera de Azua y las llanuras menores de Estebania y El Hatillo, constituidas por depósitos de origen fluvial, a veces en terrazas y más raramente en abanicos, representados por sucesiones de gujarros, arenas y arcillas. En la llanura de Azua los depósitos aluviales muestran, procediendo hacia la costa, un progresivo aumento tanto de los niveles francamente arcillosos como de la fracción fina en los horizontes mixtos.

En la desembocadura del Río Tabara se encuentran dunas costeras y una amplia área palustre-lagunar.

### 9.4.2 Tectónica

El área en cuestión se inserta en el contexto tectónico regional que se caracteriza como un sistema de pliegues en el cual la tectónica neogénica ha reactivado las cuencas sinclinales en la forma de “Ramp Basin” sedimentarias, bordeadas, mediante fallas inversas, por relieves anticlinales.

Las estructuras plegadas que se observan en las unidades de relleno de estas cuencas, como la individualizada por el anticlinal de Quita Coraza, son una consecuencia directa del cierre progresivo de estas cuencas.

La situación tectónica de la zona de Azua está ulteriormente complicada por la presencia de una dorsal asísmica, conocida como Beata Ridge, cuya migración hacia el NE, provocando su internación en el Golfo de Azua, ha producido una rotación y una encorvadura de los principales elementos tectónicos presentes en las áreas involucradas por el fenómeno.

La presencia de relieves alineados como la Loma de Vigía, Cerro Fermina y Cerro El Peñón es indicativa según nuestra interpretación de un alto estructural parcialmente sepultado, que constituye un divisorio de aguas subterráneas entre la llanura costera de Azua y la adyacente llanura de Estebania.

Otro elemento distintivo es el representado por el alto estructural y morfológico presente entre Sabana Yegua y el Río Yaque del Sur, límite NO del área estudiada, que determina la separación de la cuenca de Azua respecto del Valle de San Juan, cuyo levantamiento se ha realizado en una fase posterior a la de plegamiento.

## 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 2 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 8 hojas del mapa topográfico nacional en escala 1:250000 relativos a la Planicie de Azua).

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 157 pertenecen a la Planicie de Azua
- las fichas de identificación de 114 estaciones de aforos de las cuales 11 se encuentran en cuencas de la Planicie de Azua
- las fichas de identificación de 28 estaciones meteorológicas instaladas en el curso del proyecto, de las cuales 4 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 incluidas 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 la Planicie de Azua 69 puntos. Entre estos, 56 resultaron aptos para ser incluidos en la red de control piezométrico, 43 resultaron aptos para la red de calidad y 2 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 157, de los cuales el 68.2% son pozos. De los pozos/sondeos, el 22.9% pertenecen a particulares, el

---

11.5% a INAPA y el 22.3% al INDRHI. Los pozos se utilizan principalmente para el riego (39.5%) y a fines domésticos (15.3%). Los equipos de bombeo más utilizados son las bombas de eje vertical (60.0%), las eléctricas sumergibles (21.5%) y las bombas manuales (7.7%).

## 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 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 no eran dedicados para el control piezométrico, se tomaron en cuenta para el monitoreo todos los puntos (66 por un total de 820 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 de la red “histórica” del INDRHI (para dar continuidad a las medidas) 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 63.6% del total considerado

El mapa piezométrico se realizó utilizando las cotas determinadas con el método GPS diferencial en 53 puntos de la Planicie de Azua 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 George (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 la Planicie de Azua en 2 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 120 muestras de agua de la red de calidad.

### **9.6.3 Monitoreos especiales (isótopos, aguas minero-medicinales, potabilidad)**

En el curso del proyecto se han efectuado una campaña de monitoreo, por un total de cuatro muestras, con determinación de O18, D y T. En una sola de las muestras tomadas se determinó también el contenido de C13 y C14.

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 7 aguas, 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 38 pozos pertenecientes a la Red de Calidad.

Las 7 muestras tomadas expresamente para esta investigación han sido sometidas a la determinación de los parámetros químico-físicos y microbiológicos enumerados en el pár. 6.4.3. En el mismo párrafo están indicados también 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 Control de la salinidad y de la intrusión marina**

El número total de puntos de la red de control de la intrusión marina fue de 2, la distribución está presentada en el mapa: “Mapa de control de la intrusión marina” (Mapa 5).

Para obviar a la escasez de puntos idóneos para la ejecución de los perfiles verticales de salinidad, en las zonas costeras de proyecto el análisis a los fines de la individualización del fenómeno de la intrusión marina se extendió a todos los puntos de la red de control de la calidad. Para alcanzar el objetivo se llevó a cabo un análisis del contenido de cloruros relevado en todas las muestras analizadas, seleccionando punto por punto aquella con el tenor más elevado.

### 9.6.5 Geofísica

Objetivo específico de la prospección geofísica fue el estudio del problema de la intrusión marina en el área de Estebanía - Las Charcas

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          | 17        |
| S.E.V. con AB = 500 m          | 25        |
| S.E.V. con AB = 1000 m         | 0         |
| <b>Total S.E.V. realizados</b> | <b>42</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 la Planicie de Azua:

- Realizar un embrión inicial de red de control de la intrusión marina.
- Servir de calibración para la interpretación de la geofísica.
- Adquirir datos relativos a los parámetros hidráulicos de los acuíferos (T, K, S).

En relación con estos objetivos específicos se realizaron 2 sondeos entubados a aprox. 7” de profundidad inferior a 75 m con método a rotación directa y circulación de aire, espuma o lodo.

#### 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 eléctricas 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 sido efectuadas a intervalos regulares, así que éstas 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 4 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 El Cruce del Quince (Azua), en el mes de agosto del año 1999, consiguientemente a una variante de proyecto, se instalaron las estaciones de Estebanía, Peralta y Yayas de Viajama, para garantizar tanto un mejor control de áreas afectadas por particulares condiciones climáticas (por ejemplo el sector oriental de Estebanía), como la disponibilidad, en el futuro, de datos climáticos fiables y representativos a favor de la utilización de los modelos matemáticos lluvia-escorrentía calibrados en el ámbito del proyecto, Anexo Memorias n° 15 (cuencas de los ríos Jura, Tábara y medio Yaque del Sur).

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 9 lugares idóneos, en particular 8 secciones en cauces naturales y 1 en canal de riego (canal YSURA), para efectuar medidas mensuales.

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 hidromorfológicas 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 9 secciones de aforos de las cuales 1 relativas a canales de riego (canal Hernán Cortés, río Jura).

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 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.

Fue así que de las 90 regletas disponibles, 4 se instalaron en la Planicie de Azua, distribuidas en 2 estaciones, de las cuales, una perteneciente a la vieja red de control del INDRHI y una nueva.

### 9.6.9 Actividades agronómicas y edafológicas

El levantamiento relevamiento edafológico 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.

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:

#### **Ejecución de 14 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 120 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 7 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 relevamiento 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**

### 9.6.11 Cartografía temática

En el curso del proyecto se ha preparado tanto una cartografía hidrogeológica en escala 1:50.000 (Mapa 9/3 para la Planicie de Azua) como una cartografía de vulnerabilidad en escala 1:100.000 (Mapa 10/3 para la Planicie de Azua)

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, foteointerpretación 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; del momento que 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 un 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 sector occidental de la Planicie de Azua, o bien de toda el área de llanura que se extiende al O del pueblo de Azua, hasta el sector costero de Puerto Viejo y los depósitos de conoide que bordean a la Sierra de García Martín.

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 repesurización 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 Jura y Tábara, 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 hidrogeomorfológicos 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, 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 hidrogeológica 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:

- *Porosas, sede de acuíferos de permeabilidad alta y muy productivos*: Depósitos aluviales gruesos asociados con los trechos intermedios de los ríos Tábara y Jura.
- *Porosas, sede de acuíferos de productividad importante y/o media, freáticos o confinados*: La mayoría de los depósitos cuaternarios del área, comprendiendo depósitos gruesos de conoide, como aluviones gruesos en condiciones hidrogeológicas típicamente freáticas, hasta depósitos con niveles arcillosos importantes que determinan condiciones típicamente confinadas. Esta última tipología caracteriza a una vasta área del sector occidental, que, desde algunos kilómetros al S de la carretera Azua-Barahona, se extiende hasta la línea de costa.
- *Porosas, sede de acuíferos locales y discontinuos, de permeabilidad moderada o baja, poco productivos*: Formaciones continentales neogénicas (tpl'MI, tpl-qp'Mc); Depósitos fluviales (finos y escasamente alimentados) del sector de El Tortuguero; Terrazas aluviales suspendidas.
- *Fisuradas, sede de acuíferos extensos y productivos, de permeabilidad normalmente alta*: Calizas de la Sierra de Martín García (teo-tmi'c),.
- *Fisuradas, sede de acuíferos locales y discontinuos, de permeabilidad medio-baja*: Formación calcáreo-margosa Sombrero (tmi'c); Facies calcareníticas de los flysch del grupo de Peralta (teo-tolm'FI).
- *Formaciones de baja permeabilidad y sin acuíferos significativos*: Formaciones flyshoides en sus facies de granulometría prevalectivamente fina arcillosa (teo-tolm'FI). Depósitos continentales predominantemente margosos-pelíticos (Tmis'Mm); Depósitos cuaternarios costeros.

La determinación a través de los ensayos de bombeo de algunos parámetros hidrogeológicos (tab.6.6.2/1) de las formaciones acuíferas aluviales ha evidenciado cómo la transmisividad en las formaciones porosas de la llanura de Azua varía muy poco y presenta un valor medio de magnitud de  $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . El gradual aumento de las intercalaciones finas hacia el Sur y la predominancia en este sector meridional de condiciones de confinamiento no determina sin embargo variaciones significativas de la permeabilidad total de los depósitos, debido a la existencia de horizontes gruesos y bien permeables, aunque de espesor pequeño, entre depósitos de limos y arcillas predominantes.

Un único dato interpretado para la llanura de Estebanía indica un valor de T comparable con los medidos en las de la llanura de Azua.

### 9.7.2 Pozos, sondeos y manantiales

Los pozos, se concentran en las 2 áreas de llanura de: Estebanía-El Hatillo, al E de la

ciudad de Azua, y la de Azua-Pueblo Viejo, al O de la misma.

En el área Estebanía-El Hatillo, los pozos son perforados en un acuífero freático.

En el área Azua-Pueblo Viejo, los pozos son numerosos y se caracterizan como artesianos (surgentes o no surgentes) en todo el sector S, y en capa libre en la parte N.

No se encuentran manantiales importantes en el interior del área de estudio, excepto el manantial La Furnia en proximidad del pueblo de Barrero.

Otros manantiales de modesta entidad están indicados de todas maneras en los márgenes de los relieves calcáreos y flyshoides del área.

### 9.7.3 Piezometría

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

Las piezometrías de las dos sub-áreas que constituyen la zona de estudio (Estebanía-Hatillo y llanura de Azua-Pueblo Viejo) resultan bien distintas. Los dos acuíferos están separados por una zona geomorfológicamente más elevada que hemos interpretado también como un divisorio de aguas subterráneas, inmediatamente al E de la ciudad de Azua.

#### - Sector de Estebanía

El sector E (llanura de Estebanía, ya que las informaciones disponibles en el sector de Hatillo no son suficientes para definir una piezometría) se caracteriza por:

- . gradientes elevados del orden de 30 por mil inmediatamente aguas arriba del pueblo de Las y

- . un sector de cotas piezométricas muy bajas, inferiores a cero metros, al S de Estebanía - Las Charcas.

Se trata de un área crítica para los fenómenos de intrusión de agua salada.

Las líneas de flujo se extienden desde el NE hasta el SO en los abanicos aluviales arriba del pueblo de Las Charcas, y desde el N hacia el S aguas arriba del pueblo de Estebanía.

#### - Sector de Azua-Pueblo Viejo

Este sector se caracteriza por gradientes piezométricos mucho más pequeños (orden de 5 por mil). Una línea divisoria de aguas subterráneas se individualiza, según un alineamiento casi N-S en correspondencia de algunas pequeñas lomas de litologías menos permeables (tp-l-qp'Mc), desde el Cruce del Quince hacia el estuario del río Tábara. El sector alto de la llanura presenta una interdependencia con los ríos Jura y Tábara. Otro elemento de gran interés es, sin duda, el papel que juega el gran sistema de canalización del área, sobre todo con sus pérdidas, ya bien conocidas en bibliografía como elemento importante en el balance general de las aguas subterráneas.

En el sector al S de la línea de artesianismo visible en el Mapa 11, las líneas de flujo se extienden desde el N-NO hacia el S-SE y - a pesar de la falta de datos - tienen que modificar sus direcciones según el curso del río Jura, inmediatamente al N de la Loma de la Vigía, ya que esta última juega el papel de barrera hidrológica a nivel regional.

Por lo que se refiere al análisis de las variaciones piezométricas en el tiempo, los mínimos se observan esencialmente alrededor del mes de Mayo (entre Abril y Agosto): los máximos por otro lado tienen mayor frecuencia, bien evidente, en Septiembre y se sitúan esencialmente entre este mes y Octubre.

Las variaciones anuales son generalmente mayores de 1 m: las máximas observadas no superan a los 2.5 m.

Por lo que atañe a las variaciones de los niveles medios después del 1970, con los pocos

datos históricos que disponemos se puede observar que los niveles en general han subido (variaciones mayores de 50 cm) en el área al Oeste, Sur y Sur-Oeste de Azua. No se tienen datos para establecer las variaciones en el área de Estebanía – Las Charcas

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

La red de control propuesta cuenta con 15 puntos, de los cuales 2 (13%) están dedicados solamente a la red y 13 (87%) son privados. Los puntos de la red sin bomba son 14 (93%) y con bomba instalada solo 1 (7%).

La repartición en el espacio de los puntos propuestos está en acuerdo con los criterios generales indicados en este mismo informe y se concentran en los dos acuíferos principales.

#### **9.7.4 Calidad de las aguas subterráneas y caracterización hidroquímica**

La caracterización que emerge del análisis de los datos químicos, relativos a las aguas subterráneas, pone en evidencia una situación generalmente homogénea en toda la zona objeto de investigación del presente proyecto. Están presentes tres grandes familias hidroquímicas:

aguas bicarbonato-alcalino-térreas;  
aguas bicarbonato-alcálinas;  
aguas de elevado tenor de cloruros.

Las aguas bicarbonato-alcalino-térreas, representativas de la recarga regional, resultan ser las más numerosas y homogéneamente distribuidas. Estas aguas tienen en general una salinidad medio-alta que ocasionalmente alcanza puntas de poco más de 1 g/l.

Las aguas bicarbonato-alcálinas aparecen de manera ocasional, pruebas de situaciones locales, cuya fenomenología no tiene comprobaciones a nivel de estructura hidrogeológica conocida. Se trata de aguas con contenido de sales disueltas de intermedio 0,5-0,6 g/l a elevado 2,5 g/l.

Por último se releva la presencia de aguas de elevado contenido de cloruros, que se localizan en el sector costero oriental del área. En general este tipo de aguas presentan salinidades de elevadas a muy elevadas, hasta 8 g/l. Considerando la ubicación de estos puntos, todos cercanos a la línea de costa, resulta evidente el aporte del componente marino. Sin embargo, queda poco clara la composición de partida del agua antes de la contaminación, composición que ve un componente clorurado-alcalino-térreo no encontrado en los demás pozos examinados.

Con respecto a las características de potabilidad de las aguas subterráneas, en el sector oriental están presentes amplias zonas de comprometimiento de las capas acuíferas, mientras que las aguas subterráneas mantienen una calidad aceptable, salvo intermitentes y esporádicos ascensos de la carga salina, en toda la llanura de Azua.

Los problemas principales se individualizan tanto en las cercanías de la población de Azua como en las planicies costeras de Estebanía y Hatillo.

El entorno de Azua muestra anomalías derivadas de altos contenidos de sulfatos y, subordinadamente, por elevadas, pero no persistentes, cargas salinas.

En las planicies de Hatillo y Estebanía, el problema principal está causado en las cercanías de la costa por los efectos de la contaminación con agua marina.

### **9.7.5 Salinidad e intrusión marina**

La red utilizada fue muy afectada por la disponibilidad muy escasa de puntos aptos para la ejecución de las mediciones con la sonda multiparamétrica. En efecto, la sonda puede ser utilizada sólo en pozos libres de cualquier impedimento para evitar la pérdida del instrumento.

La distribución de los cloruros indica una situación de particular comprometimiento, mientras que la franja costera centro-occidental denota una situación de riesgo en evolución. En general la situación de riesgo o de comprometimiento por el momento está limitada a las áreas de llanura que dan a la costa.

En la zona están disponibles dos perfiles: el más cercano a la línea de costa pone en evidencia la completa alteración del acuífero dados los valores muy elevados y constantes presentes ya desde la superficie piezométrica; el perfil ubicado más al interior en cambio hasta la profundidad investigada, 55 m, presenta valores normales. Disponiendo de una sola lectura es posible formular la hipótesis de una situación inicial de comprometimiento de los acuíferos.

### **9.7.6 Resultados análisis isotópicos**

La combinación de las informaciones obtenidas de los isótopos estables y las informaciones químicas parece indicar una influencia muy limitada de las aguas marinas sobre las dulces.

El contenido de Tritio coloca a las muestras en el ámbito de la recarga anterior al pico registrado en 1961.

El único dato relativo a los isótopos del Carbono<sup>14</sup> resulta alterado por la presencia de consistentes cantidades de materia orgánica, la edad calculada según los distintos modelos propuestos por la literatura varía desde un mínimo de 1300 hasta un máximo de 11500 años.

### 9.7.7 Relaciones ríos-acuíferos

En la zona hidrogeológica de interés la contribución directa a la escorrentía superficial es bastante omisible, el régimen hidrológico local es de tipo esporádico. Los ríos y arroyos juegan un papel de alimentación de los acuíferos y las aguas escurren en superficie, en condiciones de escorrentía natural, sólo en correspondencia de episodios pluviométricos importantes.

En particular, por lo que atañe al intercambio napa-río, se evidencia:

- río Jura: se caracteriza por ser perenne en su trecho superior (arriba de la zona hidrogeológica de interés), esporádico en el sector mediano (cerca del puente de la carretera Sánchez), debido al efecto conjunto del canal H. Cortés y de la recarga directa del sistema acuífero, y luego perenne desde el área de Las Clavellinas por todo su trecho terminal por el doble efecto de surgencias aguas arriba y de entrada de aguas de retorno de riego (caudal promedio alrededor de los 0.186 m<sup>3</sup>/s medido en la sección de aforo de Las Clavellinas en el período septiembre 97-agosto 98, período seco en sentido climático, véase Anexo Memorias n°2).
- río Tábara: es perenne en la cuenca alta, mientras que en la cuenca media y baja su régimen hidrológico está totalmente distorsionado por los efectos del sistema de canalización Ysura que llega desde el río Yaque del Sur (dique derivador de Villarpando). Desde entonces no puede ser clasificado como perenne en sentido natural, aunque nunca aparece seco en su trecho terminal a lo largo del cual se encuentra un incremento de caudal seguramente relacionado con la entrada de aguas de retorno de riego. Por eso no es posible llegar a una evaluación cuantitativa del intercambio napa-río.

Para mayores detalles, refiérase a los Anexos Memorias n° 13 y 14.

### 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 9/3: Mapa hidrogeológico Planicie de Azua, tiene un área total de 1092.0 km<sup>2</sup>, una precipitación promedio anual de 722.8 mm y una evapotranspiración potencial de referencia alrededor de los 1730 mm.

Ésta se caracteriza, por lo que atañe a las áreas de recarga directa, por formaciones porosas (azul), de permeabilidad de alta (terrenos de aluvión de los ríos Tábara y Jura) a baja, y por formaciones fisuradas (verde) con acuíferos de permeabilidad alta y medio-baja, las cuales, en conjunto, tienen una superficie de 819.2 km<sup>2</sup>, esto es el 75% de la superficie total.

En términos generales, las principales fuentes de las aguas subterráneas son: la recarga pluvial directa y la recarga por flujo de retorno de aguas de riego (exceso de riego) e infiltración en canales.

En conjunto, teniendo en cuenta las características morfológicas, hidrogeológicas e hidrológicas, han sido individuadas 16 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): 42.92 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a;
- años secos (T=5 años): 51.04 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a;
- año medio: 76.39 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a;
- años húmedos (T=5 años): 96.42 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a;
- años húmedos (T=10 años): 114.38 \* 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 canales Estebanía-Las Charcas, YSURA alto, YSURA bajo y Hernán Cortés.

En conjunto la recarga media anual total en la zona hidrogeológica de interés alcanza el valor de 102.93 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a así repartido:

- recarga pluvial directa: 76.39 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a;
- recarga por exceso de riego: 26.54 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a;

Para mayores detalles, refiérase al cap.7.1.8 y al Anexo Memorias n° 14.

### 9.7.9 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad en el territorio examinado es en general medio-baja, con áreas relativamente más vulnerables a lo largo del río Tábara, en las estrechas franjas costeras de las planicies de Estebanía y El Hatillo, y en un sector circunscripto aguas abajo de Sabana Yegua.

En la distribución de las clases de vulnerabilidad en el área, resalta por último la parte inferior de la planicie de Azua, donde las condiciones de confinamiento del acuífero, determinan un grado de protección local decididamente elevado.

Por lo que se refiere a las actividades antrópicas de posible impacto sobre los acuíferos locales, no emerge la existencia de particulares situaciones críticas; las industrias locales son en general de transformación alimenticia y resultan por lo tanto de impacto reducido.

### 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 debido a un aumento de explotación del sistema hídrico subterráneo del orden de  $8 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año distribuida sobre una superficie total de poco menos de 100 km<sup>2</sup> al O de la ciudad de Azua. Trátase de un aumento importante en valores absolutos, pero sin embargo pequeño en comparación con los caudales de la red de riego superficial, que se caracteriza sólo en correspondencia del canal Ysura por caudales superiores a los  $250 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año (sector de Tabara Abajo).

Los resultados de esta simulación evidencian una variación piezométrica muy fuerte; con máximos de casi 20 m en el sector N y progresivamente menores hacia el S (en dirección de Puerto Viejo). El efecto es extremadamente positivo en términos de disminución de las pérdidas desde el sistema subterráneo (también desde los pozos surgentes en vías de progresivo abandono) en el sector meridional. Como ya se recordó en distintas ocasiones, en efecto, se trata de un sector afectado por extensos fenómenos de inundación, con un enorme impacto sobre las tierras cultivables.

La simulación se encuadra por lo tanto en una óptica más amplia, o bien aquélla de suministrar informaciones útiles para un correcto manejo integrado de los recursos hídricos superficiales y subterráneos. Dejando firme la oportunidad de restablecer en el área el uso de recursos hídricos subterráneos y eventualmente el interés en extender hacia el E las áreas con suministro de aguas superficiales, el interés verdadero de la simulación debe buscarse en la evaluación cuantitativa de los impactos.

Para las simulaciones de la intrusión marina, se ha utilizado el simulador numérico de reservorio TOUGH2 (Pruess, 1991; Pruess et al. 1999), código de cálculo 3D de diferencias finitas integrales, saturado/no saturado y densidad dependiente. Entre los módulos termodinámicos disponibles en TOUGH2, se ha elegido el módulo EWASG (Battistelli et al., 1997) que permite la simulación del flujo multifásico de mezclas constituidas por agua, cloruro de sodio y un gas no condensable, el aire para esta aplicación específica.

En el ámbito de la Planicie de Azua, se elaboró un modelo 2D en sección vertical por medio del código de cálculo TOUGH2. La sección elegida, ubicada en el la zona oriental del sector de Estebanía, se extiende con rumbo SSO-NNE desde la línea de costa hasta la posición estimada de la isopieza 100 m s.n.m., por una extensión de 6.6 km. El cuadro hidrogeológico reconstruido en el ámbito del presente proyecto, como así también los datos

específicos relativos a la posición de la interfase agua dulce – agua salobre, ha permitido una calibración del modelo de intrusión marina sólo con referencia a la situación actual observada. El modelo calibrado ha sido utilizado para predecir la evolución futura del fenómeno tanto en la hipótesis de mantener las extracciones en el nivel actual como en la de aumentarlas progresivamente.

La sección considerada, ubicada en la zona este del sector de Estebanía, está caracterizada por extracciones elevadas utilizadas predominantemente para fines de riego, y por una piezometría que presenta valores inferiores a 1 m hasta una distancia de más de 3 km de la costa. La simulación del estado natural llevada a cabo sugiere que la intrusión marina afectaba inicialmente a una limitada franja costera, con una interfase agua dulce - agua salobre que se ahondaba rápidamente alejándose del mar.

La simulación de las extracciones efectuadas en los últimos 30 años con caudal total estimado aproximadamente igual a la recarga del acuífero, indica que estas extracciones han determinado el comprometimiento de la franja costera del sector de Estebanía.

Las simulaciones de la explotación futura del acuífero indican que un incremento de las extracciones llevará a una notable extensión de la zona costera contaminada por cloruros. También la prosecución de las extracciones con los ritmos actuales debería determinar, aunque con una progresión más lenta del fenómeno, la extensión de la zona afectada por la intrusión marina.

#### **9.7.11 Recursos hídricos y reservas hídricas subterráneas**

Se estima una recarga directa del orden de los  $76.4 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/a, con referencia al año promedio, valor que se reduciría a  $42.9 \cdot 10^6$  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

El régimen hidrológico de la Planicie de Azua se caracteriza de una manera muy distinta en las áreas al este y al oeste de la ciudad de Azua.

Al este de la ciudad de Azua, los ríos (por ej. el arroyo Hatillo y el río Grande, los ríos más importantes en el sector) son nada más que arroyos y cañadas secos y alimentan el acuífero. El río Grande, en particular, tiene un régimen hidrológico distorsionado por el efecto del canal Estebanía-Las Charcas, en su cuenca alta, aguas arriba del canal, el régimen es de tipo perenne mientras que aguas abajo, por efecto conjunto de la toma para riego y de la infiltración en la napa, hay escorrentía superficial sólo cuando ocurren episodios pluviométricos importantes.

Al oeste de la ciudad de Azua, aparecen dos ríos importantes, el río Jura y el río Tábara:

- el río Jura se caracteriza por ser perenne en su trecho superior, arriba de la zona hidrogeológica de interés (el caudal natural promedio anual en El Carrizal es alrededor de los 2 m<sup>3</sup>/s, Tab. 7.2.1/1 y pár. 7.2.3), esporádico en el sector mediano (cerca del puente de la carretera Sánchez), debido al efecto conjunto del canal Hernán Cortés y de la recarga directa del sistema acuífero, y luego perenne desde el área de Las Clavellinas por todo su tramo terminal por el doble efecto de surgencias aguas arriba y de la entrada de aguas de retorno de riego. El afluente Arroyo Irabón está casi siempre seco debido también al aprovechamiento hídrico para fines de riego.
- el río Tábara es perenne en la cuenca alta (el caudal natural promedio anual en Tábara Abajo es de alrededor de los 0.8 m<sup>3</sup>/s, Tab. 7.2.1/1 y pár. 7.2.3), mientras que en la cuenca mediana y baja su régimen hidrológico está totalmente distorsionado por los efectos del sistema de canalización YSURA que llega desde el río Yaque del Sur; en su tramo terminal nunca aparece seco, hecho seguramente relacionado también con la entrada de aguas de retorno de riego.

Por lo que atañe a la identificación de la entidad promedio mensual de la escorrentía torrencial y del flujo base, no disponiendo de datos hidrológicos medidos suficientes y fidedignos, fue preciso basarse en los resultados de la aplicación de los modelos matemáticos lluvia-escorrentía por los cuales resultó, con referencia a las cuencas altas:

- río Jura, una contribución media del flujo base alrededor del 57% de la escorrentía total (cv = 0.51);
- río Tábara, una contribución media del flujo base alrededor del 60% de la escorrentía total (cv = 0.64).

En conjunto los recursos hídricos superficiales potencialmente utilizables en la Planicie de Azua son limitados y de hecho se refieren sólo a los ríos Jura y Tábara y varían entre 43.2\*10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (año seco, T=10) y 90.2\*10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (año promedio).

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 la Planicie de Azua se han obtenido los siguientes datos:

|   |   |        |    |
|---|---|--------|----|
| <u>total superficie agrícola</u>                        | <u>totale superficie agricola:</u>                | 29.543 | ha |
| <u>total áreas con regadíos</u>                         | <u>totale aree irrigue:</u>                       | 23.103 | ha |
| <u>total áreas con regadíos con aguas subterráneas</u>  | <u>totale aree irrigue con acque sotterranee:</u> | 2.037  | ha |
| <u>total áreas con regadíos con aguas superficiales</u> | <u>“ “ “ “ “ “ superficiaali:</u>                 | 7.983  | ha |
| <u>total áreas con regadíos con aguas mixtas</u>        | <u>“ “ “ “ “ “ miste:</u>                         | 13.083 | ha |

La Planicie de Azua es la que presenta menores necesidades de ampliación de las áreas con regadío.

Zonas actualmente no cultivadas, cubiertas por pastos y sabana están localizadas preponderantemente en el área Puesto Plátano, Estebanía y Hatillo, pero se trata de suelos pertenecientes predominantemente a la sexta clase y por lo tanto no regables. En esta zona, las tierras mejores están ya bajo riego, aunque no se las está aprovechando completamente.

En la zona examinada existen sobre todo problemas de excesivo consumo de agua por causa de una gestión poco cuidadosa de los turnos y de las dosis. El desperdicio evidente de agua provoca el ascenso de la capa manadera y el consiguiente incremento del nivel del pantano que se encuentra cerca del mar, que se ha formado en consecuencia del ciclón David y que ha ido aumentando paulatinamente con la puesta en cultivo de nuevas tierras.

En el conjunto, las áreas susceptibles al riego suman 1.694 ha. Nel complesso, le aree suscettibili di irrigazione individuate nel distretto di Neiba ammontano a 10.747 ha.

De éstas, 1.007 ha pertenecen a la tercera clase de susceptibilidad y 687 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 la Planicie de Azua, la demanda neta anual por hectárea asume un valor promedio de 718 mm, oscilando desde un mínimo de 416 hasta un máximo de 1337 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**

El análisis de la utilización de las aguas subterráneas requiere una neta separación entre el sector de la planicie de Azua propiamente dicha (al oeste de la ciudad de Azua) y el sector oriental de Estebanía.

En el primero la utilización de las aguas subterráneas representa un porcentaje apreciable del balance total, con tomas para fines hidropotables (Azua y otros centros menores) y agrícolas (en consideración de los extensos cultivos). Sin embargo la neta predominancia del uso de recursos superficiales (en máxima parte procedentes del río Yaque del Sur – canal Ysura) ha implicado una progresiva reducción de las tomas a partir de pozos (más onerosos) con efectos sobre el medio ambiente muy relevantes, en particular la represurización de los acuíferos y el consiguiente empantanamiento de una parte del sector meridional entre los ríos Jura y Tábara.

Por lo que atañe al sector oriental (Estebanía), las tomas para uso agrícola son en cambio muy elevadas debido a la ausencia de hecho de una red hídrica superficial. Se trata de un área de elevada criticidad tanto por la cantidad del recurso efectivamente utilizable, como por los problemas cualitativos consiguientes a los fenómenos de intrusión marina en acto.

### 9.7.15 Utilización de las aguas superficiales

La demanda de recurso hídrico superficial en la Planicie de Azua resulta (Tab. 7.1.11/1 y 7.2.2./1-2):

- para aprovechamiento urbano (aguas potables): caudal de explotación de alrededor de los 0.158 - 0.224 m<sup>3</sup>/s (INAPA), valores tales que no dan lugar a situaciones de posible criticidad; la única advertencia es que siendo la utilización de tipo hidropotable, es necesario garantizar la calidad del recurso hídrico utilizado;
- para riego: con referencia al sector comprendido entre la cuenca del río Tábara y el río Vía (Azua), la hidroexigencia neta está evaluada en aproximadamente 92\*10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (equivalente a una demanda bruta del orden de los 180 - 270\*10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, eficiencia global de riego entre 30 y 50%).

El elevado valor de la demanda bruta de agua para fines de riego está satisfecho sólo en parte, aproximadamente el 15-23%, por recursos procedentes del interior del área de Azua (canales de Tábara Arriba, río Tábara, Hernán Cortés e Irabón, cuenca del río Jura); la cobertura de la necesidad está asegurada por lo tanto por recursos exteriores a través del sistema YSURA alimentado por el río Yaque del Sur (toma de Villarpando).

El actual nivel de utilización de las aguas del río Jura resulta compatible con la oferta natural de la cuenca; tomas más elevadas no resultarían en cambio garantizadas por períodos temporales de dimensión significativa ya con referencia al año promedio; además implicarían una reducción de la escorrentía que alimenta el sistema acuífero con consiguiente alteración de los actuales equilibrios hidrogeológicos.

Por lo que atañe al río Tábara, mientras que en su tramo medio-bajo el régimen de la escorrentía está totalmente alterado por el canal YSURA, en la cuenca de montaña el actual nivel de las tomas resulta compatible con la oferta natural aun con referencia a años secos; sin embargo, análogamente al río Jura, un incremento de dichas tomas resultaría ciertamente crítico, en particular en años secos.

Para mayores detalles, refiérase a los Anexos Memorias n° 15 y 17.

### 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 Jura en El Carrizal (vieja estación del INDRHI, código 462001), período 1983-1990 (8 años);
- río Tábara en Tábara Abajo (código 470001), período 1968-1994 (27 años).

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 cada cuenca:

- río Jura en El Carrizal (superficie = 112 km<sup>2</sup>):

precipitación promedio = 1335 mm; escorrentía total promedio = 593 mm (Q = 2.05 m<sup>3</sup>/s); valores del coeficiente de escorrentía elevados y caracterizados por una discreta variabilidad temporal; régimen hidrológico de tipo torrencial aunque permanente; significativa variabilidad temporal de los caudales de estiaje y reducida permanencia en el cauce de valores de la escorrentía de interés para los fines de la utilización.

- río Tábara en Tábara Abajo (superficie = 157 km<sup>2</sup>):

precipitación promedio = 809 mm; escorrentía total promedio = 168 mm (Q = 0.81 m<sup>3</sup>/s); valores del coeficiente de escorrentía caracterizados por una elevada variabilidad temporal; régimen hidrológico de tipo torrencial aunque permanente; elevada variabilidad temporal de los caudales de estiaje; reducida permanencia en el cauce de valores de escorrentía de interés para fines de utilización

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 los dos sectores que constituyen la Planicie, los resultados del análisis desarrollado ponen en evidencia cómo:

- en el sector occidental (al oeste de la ciudad de Azua) es de buen auspicio un incremento de las tomas para permitir una reducción de los niveles piezométricos actuales. El efecto positivo que se entendería conseguir es una reducción de las áreas sujetas a empantanamiento en la zona meridional de Puerto Viejo-Pueblo Viejo. Tal incremento de las tomas concurriría también a liberar recursos superficiales del sistema YSURA para acarrearlos hacia el sector oriental (Estebanía) como alternativa a las locales tomas subterráneas. Además un mejoramiento de la eficiencia global de riego, concurriría a su vez a una benéfica reducción de los impactos consiguientes a los recientes fenómenos de represurización de los sistemas acuíferos locales.
- en el sector oriental (Estebanía), la situación actual es extremadamente crítica con tomas para fines de riego comparables con la recarga natural. La modelización de la intrusión marina ha confirmado la criticidad de la situación actual poniendo en evidencia también que los fenómenos de migración de la interfase agua dulce-agua salobre están probablemente aún en acto. En dicha área sería de buen auspicio por lo tanto una significativa reducción de las tomas (por lo menos de 50%) para permitir la detención de los procesos de intrusión marina en curso, o bien posiblemente su inversión.

Con respecto a los recursos hídricos superficiales, con referencia a los dos sectores que constituyen la Planicie, los resultados del análisis desarrollado ponen en evidencia cómo:

- en el sector occidental (ríos Tábara y Jura) no pueden proponerse ulteriores utilizaciones del recurso local en cuanto para el río Jura no resultarían garantizadas por períodos temporales de dimensión significativa y además implicarían una reducción de la escorrentía que alimenta el sistema acuífero con consiguiente alteración de los actuales equilibrios hidrogeológicos, mientras que para el río Tábara (cuenca alta) resultarían ciertamente críticas, en particular en años secos.
- en el sector oriental (Estebanía), de hecho careciente de recursos superficiales significativos, la reducción de las tomas que sería de buen auspicio podría ser cubierta por los recursos superficiales del sistema Ysura a través de un incremento de las tomas de aguas subterráneas en el sector occidental y/o un leve mejoramiento, del orden del 1.5-2%, de la actual eficiencia global de riego. Además, la consiguiente reducción en el sector occidental, de la recarga por flujo de retorno de aguas de riego (exceso de riego) e infiltración en canales, que puede estimarse en aproximadamente  $1.0 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ , contribuiría ulteriormente a mejorar la situación del nivel piezométrico haciéndolo descender, desde el momento que actualmente es excesivo.

## 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 la 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 18 en la Planicie de Azua, están 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 realizar una red adecuada al control areal del fenómeno de intrusión marina, sería necesario efectuar perforaciones a lo largo de una dirección ortogonal a la piezometría en el área de Estebania. El orden de magnitud de la profundidad a alcanzar está dado por la estimación indicada por el cociente de Ghybern-Herzberg, en la cual se define una proporción de aproximadamente 1:40 entre la cota piezométrica sobre el nivel del mar y la profundidad de la interfase agua dulce-agua salada.

Naturalmente, en el curso de la perforación será necesario efectuar logs verticales de salinidad que permitan adecuar el objetivo de la perforación al caso específico. En línea de máxima las perforaciones deberán superar la profundidad de –50 m sobre el nivel del mar.

La distancia y el número de pozos a efectuar a lo largo de cada perfil deberá ser función de los resultados obtenidos, tomando la precaución de proceder en las perforaciones desde el mar hacia el interior. De todas maneras, el número no deberá ser inferior a tres.

Las zonas caracterizadas por extracciones intensas requerirán tanto la disminución de la distancia entre los perfiles, como su localización respecto al centro de las depresiones piezométricas existentes.

La red deberá ser tenida bajo control con una cadencia semestral, de tal manera se podrán entrecruzar los datos relevados con logs verticales de salinidad, con aquellos relativos al contenido de cloruros relevados a partir de la red de control de la calidad de las aguas subterráneas. Naturalmente, para los cloruros deberán tomarse en consideración los pozos ubicados en las primeras dos zonas.

La ubicación del perfil sugeridos está ilustrada en el mapa 3.

Para afinar la interpretación isotópica, 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 inadecuadez de algunos de los límites fijados por la norma nacional, que han resultado tan restrictivos, como injustificados, que un 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 (fijar 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 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 reutilización.

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.

Las actividades de modelización han puesto en evidencia que, por lo que concierne

al sector occidental del Valle de Azua (al O de centro poblado homónimo), resulta evidente la necesidad de proceder a un importante incremento de las tomas para permitir una disminución de las cargas piezométricas sobre todo en el sector meridional de Puerto Viejo – Pueblo Viejo. En tal sentido se recuerda que la mayor emergencia en el sector concierne a los fenómenos de inundación. Obviamente un aumento del aprovechamiento de las aguas subterráneas y las consiguientes reducciones de carga piezométrica pueden inducir fenómenos de intrusión salina que deberán ser oportunamente tenidos bajo control.

Por lo que atañe en cambio al sector oriental de Estebanía se aconseja proveer a satisfacer parte de las necesidades actuales y todos los ulteriores consumos futuros utilizando aguas no extraídas del acuífero freático presente. Es necesario monitorear adecuadamente la posición de la interfase agua salobre-agua dulce de manera tal que se mejore el estado actual de los conocimientos y que se siga la evolución del fenómeno en el futuro. Se sugiere llevar a cabo el monitoreo mediante la ejecución de perfiles periódicos de salinidad en pozos perforados para dicho propósito y completados para integrar la red de control de la intrusión marina existente. El monitoreo constituirá también la base para llevar a cabo simulaciones de predicción más fidedignas del fenómeno.

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:
  - 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;
  
- 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 los canales Tábara Arriba, Hernán Cortés e Irabón, que actualmente no son 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 sollicitación sobre el régimen fluvial, como el efecto, en particular sobre las escorrentías de estiaje (equilibrio ecológico), de menores tomas consiguientes a mejoramientos de la eficiencia actual de los sistemas de riego.
  
- manejo de los recursos hídricos:
  - Teniendo en cuenta el actual nivel de utilización (se recuerda que actualmente el 77-85% de la demanda hídrica para riego está satisfecho con recursos exteriores, sistema YSURA) se sugiere:
    - recalibrar el modelo matemático lluvia-escorrentía del río Tábara sobre la base tanto de la información climática que resultará disponible consiguiente a las estaciones meteorológicas instaladas en el curso del proyecto, como de la información hidrológica que resultará disponible consiguiente a la activación de la red hidrométrica de control

(actualmente no se efectúan mediciones hidrológicas sistemáticas en la cuenca del río Tábara);

- actualizar-recalibrar el modelo matemático lluvia-escorrentía del río Jura sobre la base de la información climática y hidrológica que resultará disponible de la integración-activación de las redes meteorológica y hidrológica antes mencionadas;

- 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 criterios hidrológico representa de todas maneras un umbral mínimo que debe ser garantizado 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 de los sistemas fluviales. En un segundo momento será posible hipotetizar, también con la ayuda de los modelos de simulación suministrados, la posibilidad y sostenibilidad de ulteriores utilizaciones del recurso, en particular la extensión del sistema YSURA al sector Oriental (Estebanía), con beneficio también para el reequilibrio de los sistemas acuíferos del sector occidental (represeurización).

Se recuerda que a fin de garantizar una utilización sostenible de los recursos hídricos, la actividad de planificación debe referirse necesariamente al entero sistema cuenca, tanto en sentido hidrológico como hidrogeológico, según un método “supply-demand oriented”.

## FIGURAS

## TABLAS