

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por estar conmigo a cada momento y saber que siempre me ha ayudado y jamás me ha dejado solo.

Al **Instituto Tecnológico de Sonora** por ayudarme a cumplir uno de mis objetivos en la vida, aportándome conocimiento y muchas herramientas para salir adelante y ser un buen profesionalista.

Al **M.I. Rodrigo Gonzáles Enríquez** por ayudarme en la elaboración de esta tesis, por tenerme paciencia y sobre todo por ayudarme a entender que lo que realmente se necesita para salir adelante en esta área, estudios y muchas ganas.

Al **M.D. Armando Canales Elorduy** por tan buenas sugerencias que le dio a este trabajo y las indicaciones hechas al mismo.

Al **M.I. Luís Alonso Islas Escalante** por la revisión de este trabajo y sobre todo por ser muy buen maestro y darme consejos.

Al **Departamento de Ingeniería Civil** por el apoyo proporcionado para la realización de esta Tesis.

A mi mama **Fátima Núñez Quezada** por todas las noches y días que aportaste para que yo pudiera cumplir este sueño tan anhelado.

A mi papa **Jesús Arvízu Valenzuela** por ayudarme a solventar los gastos de mis materias.

RESUMEN

Con el objetivo de localizar sitios favorables para perforación de pozos, en este estudio se realizaron 33 sondeos geofísicos para los Block's 2104 y 2206, tomando en cuenta la ubicación y profundidad de los diferentes sitios en donde posiblemente se encuentre el agua subterránea de buena calidad para uso agrícola.

Las exploraciones en campo se realizaron con el medidor de resistividades, los datos se procesaron con modelos geofísicos, generando mapas de resistividad de los materiales y el agua que los satura desde 0 a -300 msnm.

Los resultados indican que entre 0 a -40 msnm se observa predominio de resistividades $<6 \Omega\text{-m}$. Desde -50 a -60 msnm se localizan resistividades entre 110 y 500 $\Omega\text{-m}$ correspondientes a basamentos, de -70 a -100 msnm se encuentran resistividades de 70 $\Omega\text{-m}$. En este estrato predominan resistividades $<10 \Omega\text{-m}$. Entre -120 msnm y -140 msnm se observa una zona reducida con resistividad de 10 $\Omega\text{-m}$. Una gran proporción de la zona presenta resistividades de 2 a 6 y de 6 a 10 $\Omega\text{-m}$. Entre -160 msnm y -260 msnm se observan resistividades entre 30 y 70 $\Omega\text{-m}$, predominan en el área resistividades entre 10 y 30 $\Omega\text{-m}$. Desde -280 a -300 msnm se encuentran altas resistividades entre 110 y mayores de 500 $\Omega\text{-m}$. En el área de estudio predominan resistividades entre 10 y 30 $\Omega\text{-m}$, en menor cantidad se presenta resistividades de 30 a 70 $\Omega\text{-m}$. También se observa en el extremo sur del área en estudio la presencia de materiales de alta resistividad.

Con lo anterior se concluye que en el Block 2206, dos estratos favorables se localizan entre -50 y -100 msnm y entre 160 y 300 msnm el agua puede ser dulce. Otro estrato presenta posiblemente agua dulce entre -160 y -300 msnm. En el límite del Block 2104 el estrato que se localiza entre -80 a -160 msnm, contiene agua dulce a salobre, el cual no se recomienda explotar, ya que puede provocar transferencia de agua salobre periférica. La salinidad del agua se reduce entre -180 y -300 msnm y se extiende hacia el este-noroeste, resultando este el mejor estrato para explotar.

INDICE

Dedicatoria. -----	<i>i</i>
Agradecimientos. -----	<i>ii</i>
Resumen -----	<i>iii</i>
Índice. -----	<i>iv</i>
Lista de Tablas. -----	<i>vii</i>
Lista de Figuras. -----	<i>viii</i>

1. INTRODUCCIÓN.

1.1 Antecedentes. -----	1
1.2 Planteamiento del problema. -----	3
1.3 Justificación. -----	3
1.4 Objetivo. -----	4
1.5 Delimitaciones. -----	4

2. MARCO TEÓRICO.

2.1 GEOLOGÍA.

2.1.1 Caracterización Geológica de Rocas. -----	5
2.1.2 Propiedades Físicas de las Rocas. -----	6

2.2 HIDROGEOLOGÍA.

2.2.1 Principales Términos de Hidrogeología. -----	7
2.2.1.1 Agua en Medio de Roca. -----	7
2.2.1.2 Tipos de agua en las rocas. -----	9
2.2.1.3 Humedad y propiedades hídricas de las rocas. -----	9
2.2.1.4 Elementos principales de la estratificación hidrogeológica. -	11

2.3 HIDROLOGIA SUBTERRANEA. ----- 14

2.3.1 Características del agua subterránea. -----	15
2.3.2 Clasificación de las aguas subterráneas. -----	15
2.3.3 Propiedades físicas de las aguas subterráneas. -----	17
2.3.4 División de la hidrosfera subterránea en zonas hidrofísicas -----	18

2.4 GEOFISICA. ----- 19

2.4.1 Métodos Geofísicos. -----	19
2.4.2 Teoría de la prospección eléctrica por resistividades. -----	20
2.4.3 Teoría del flujo de la corriente.	
2.4.3.1 Medios continuos. -----	21
2.4.4 Sistemas de medición por cuatro electrodos. -----	22
2.4.4.1 Mediciones con separación creciente de electrodos. -----	22
2.4.5 Sondeo Eléctrico y su Interpretación.	
2.4.5.1 Instrumentos. -----	23
2.4.5.2 Interpretación. -----	23
2.4.5.3 Trabajo de campo. -----	24

2.5 MÉTODO ELÉCTRICO RESISTIVO. ----- 25

2.5.1 Electrodos. -----	27
2.5.2 Configuraciones electrónicas. -----	28

2.6	SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL.	-----	31
2.6.1	Interpretación de las curva de sondeos eléctricos verticales (SEV).	-----	32
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.		
3.1	Zona de estudio.	-----	34
3.2	Materiales.	-----	35
3.3	Metodología.	-----	35
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	-----	39
5.	CONCLUSION.	-----	41
6.	RECOMENDACIONES.	-----	41
7.	BIBLIOGRAFIA.	-----	43
8.	ANEXOS.		

LISTA DE TABLAS.

Tabla	Descripción	Página
1	Resistividades de diferentes materiales.	26
2	Materiales litológicos de los pozos RZ2206-20 y 132.	37
3	Resistividades de materiales y agua de saturación, y su correlación litoestratigráfica.	38

LISTA DE FIGURAS.

Figura	Descripción
1	Electrodos.
2	Arreglo Wenner.
3	Arreglo Lee.
4	Arreglo Schulumberger.
5	Localización del Valle del Yaqui, sonora.
6	Mapa Topográfico y Localización de los Sev's en la zona de estudio.
7	Resistividad a 0 msnm en la zona de estudio.
8	Resistividad a -5 msnm en la zona de estudio.
9	Resistividad a -10 msnm en la zona de estudio.
10	Resistividad a -20 msnm en la zona de estudio.
11	Resistividad a -30 msnm en la zona de estudio.
12	Resistividad a -40 msnm en la zona de estudio.
13	Resistividad a -50 msnm en la zona de estudio.
14	Resistividad a -60 msnm en la zona de estudio.
15	Resistividad a -70 msnm en la zona de estudio.
16	Resistividad a -80 msnm en la zona de estudio.
17	Resistividad a -90 msnm en la zona de estudio.
18	Resistividad a -100 msnm en la zona de estudio.
19	Resistividad a -120 msnm en la zona de estudio.
20	Resistividad a -140 msnm en la zona de estudio.
21	Resistividad a -160 msnm en la zona de estudio.
22	Resistividad a -180 msnm en la zona de estudio.
23	Resistividad a -200 msnm en la zona de estudio.

Figura	Descripción
24	Resistividad a -220 msnm en la zona de estudio.
25	Resistividad a -240 msnm en la zona de estudio.
26	Resistividad a -260 msnm en la zona de estudio.
27	Resistividad a -280 msnm en la zona de estudio.
28	Resistividad a -300 msnm en la zona de estudio.

1. INTRODUCCION

1.1 ANTECEDENTES

El Valle del Yaqui incluye una sección de planicie costera del Golfo de California en el noroeste de México, ubicada en la porción media de la zona sur del Estado de Sonora, con una localización Geográfica de $26^{\circ} 45'$ a $28^{\circ} 00'$ latitud norte y $109^{\circ} 15'$ a $110^{\circ} 45'$ de longitud oeste

La disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas ha permitido el desarrollo de una extensiva e intensiva zona agrícola formada por los Distritos de Riego 041 del Río Yaqui y 018 de las Comunidades Yaquis. Estos distritos son de los más importantes en México por su producción de alimentos, fibras (Principalmente de

trigo, maíz, soya y algodón, González *et al*, 1997). La cual es el orden de 1.5 millones de ton/año.

Las aguas superficiales provienen principalmente de los escurrimientos del Río Yaqui y son almacenadas en tres grande presas (De la Peña, 1997) mientras que las aguas subterráneas se explotan de un acuífero regional costero de tipo aluvial (Hardt, 1988).

El Valle de Yaqui, es ampliamente reconocido como una de las regiones más modernas en materia de agricultura bajo riego. Sin embargo, hoy en día, la modernización y la elevada producción agrícola ha traído consigo preocupantes consecuencias ambientales.

La zona semiárida del sur de Sonora presenta, desde su origen, una acumulación natural de sales en el perfil del suelo, debido al déficit de la lluvia y a las altas evaporaciones.

El problema de salinidad en el Valle del Yaqui es de gran importancia debido a que las áreas que se encuentran bajo riego, presentan afectación en sus diferentes grados de acuerdo a la clasificación realizada por De la Peña en 1982 (Cámara, 1991).

En el Valle del Yaqui existen acuíferos salinizados por diferentes causas al respecto se han encontrado altos contenidos de salinidad en la investigación de perfiles de pozos de explotación debido al manejo del agua de riego y a la formación geológica de la planicie costera (González *et al*, 1998).

Tomando en cuenta la información que se tiene acerca de la salinidad en el Valle del Yaqui y las ventajas que ofrece la exploración geofísica, el mes de octubre de 2002, Agrícola Cocoraque S.P.R. de R.L. solicitó al ITSON realizar una exploración geofísica a detalle, con el fin de aportar información que permita localizar la parte

idónea para perforar un pozo ubicado dentro del perímetro del predio ubicado en el Block 2206, con propósito de abastecimiento de agua para uso agrícola. Esta zona esta muy próxima a la costa (4 km.).

Por segunda ocasión, Agrícola Cocoraque S.P.R. de R.L solicita al ITSON en mayo de 2003, realizar mas exploraciones geofísicas a detalle para la localización de otro sitio de perforación para uso agrícola, en la misma zona, solo que esta vez en el Block 2104, por lo que existe el riesgo de la presencia de aguas marinas en el subsuelo o de generar un problema de intrusión salina.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a que en la zona de interés existe mucha proximidad con el mar y la información que se tiene de pozos cercanos al área donde se requiere la exploración tienen agua salobre, existirá un acuífero de agua dulce, para invertir en una perforación de pozo para abastecimiento agrícola.

1.3 JUSTIFICACION

Debido a que en los últimos años (desde 1994 a 2003) no se han presentado lluvias suficientes en el Valle del Yaqui, para tener asegurada la disponibilidad de agua para el riego de cultivos, y la evaporación consecuencia de las altas temperaturas de la región, Agrícola Cocoraque se interesó por un estudio geofísico, que le permita conocer la mejor ubicación de agua dulce para garantizar econonómicamente la inversión de una perforación de pozo profundo.

Estos estudios ayudaran a conocer los tipos de materiales que pueden conformar el acuífero situado en la franja costera del Valle del Yaqui, así como posiblemente la calidad del agua y a la profundidad a la que se encuentra.

1.4 OBJETIVO

Localizar sitios favorables para perforación de pozos dentro de los Blocks 2104 y 2206 tomando en cuenta la ubicación y profundidad de los diferentes sitios en donde posiblemente se encuentre el agua subterránea de buena calidad para uso agrícola.

1.5 DELIMITACIONES

El estudio se delimitó a los Blocks 2104 y 2206 del Valle del Yaqui y la profundidad de exploración fue de hasta -300 msnm

2. MARCO TEORICO

2.1. GEOLOGÍA

2.1.1. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DE ROCAS.

La geología de una roca es el resultado de su génesis, de su historia petrogenética, la composición mineralógica y su textura en particular. Un material de roca es un arreglo natural de minerales y partículas, Un estrato de roca es un arreglo natural de bloques de roca y fragmentos, incluyendo discontinuidades físico mecánicas y sus rellenos.

El carácter geológico de un estrato de roca es controlado principalmente por la presencia de las discontinuidades físicas que controlan la heterogeneidad y la

anisotropía del macizo. Una discontinuidad física es una superficie que interrumpe la homogeneidad de roca. En la práctica las llamadas unidades casi-homogéneas se establecen con base en las propiedades litológicas y físico mecánicas. Estas unidades son estáticamente homogéneas y limitadas por discontinuidades de magnitud correspondientes

Un propósito integrado es el gravamen de un macizo, según Matula (1979) se basa en los criterios principales siguientes:

- 1) Petrología, caracterizando los aspectos genético-petrográficos del material de la roca.
- 2) Block, expresado por el tamaño, su forma y el arreglo espacial de discontinuidades mecánicas.
- 3) Interrupción, definida por la proporción del volumen de fracturas al volumen de la masa de roca, y permeabilidad y contenido de agua de la masa

La investigación geológica requiere de evaluaciones de datos básicos, como parte de la ingeniería de diseño, la interacción de la geología ambiental con la estructura propuesta. El grado de esta interacción depende naturalmente del tipo de estructuras y las condiciones geológicas.

2.1.2. PROPIEDADES FISICAS DE LAS ROCAS

Para conocer las propiedades físicas de las rocas se puede utilizar cualquier método físico directamente o deducido de algunos campos geofísicos. Por lo contrario, existen parámetros hidrogeológicos de la roca que no pueden aun ser determinados directamente con métodos geofísicos.

Muller y Salzburg (1976) mostraron que las rocas tenían propiedades físicas (fuerza, resistividad, velocidad, elástica de la propagación de la onda, atenuación de la onda electromagnética, etc.) son de gran influencia para cargas y fracturas de alta magnitud y la transición desde un rango espacial corto o pequeño puede producir un cambio abrupto en el parámetro examinado.

2.2 HIDROGEOLOGIA

2.2.1 PRINCIPALES TÉRMINOS DE HIDROGEOLOGÍA

El medio de roca es formado, en general, de sólido, líquido y fases gaseosas, el sistema más frecuente es sólido-agua-aire, en conjunto con otros factores, las propiedades hidrogeológicas de la roca dependen de las proporciones de las fases individuales y de las propiedades físicas mecánicas.

Los objetivos de las investigaciones hidrogeológicas incluyen:

- 1) Localización de recursos de agua subterránea nuevos
- 2) Desarrollo de un esquema óptimo para utilización
- 3) Propuesta de medidas para protección de calidad y cantidad.
- 4) Proponer la medida más efectiva para la protección del agua subterránea de contaminación y agotamiento.

Este último requiere evaluación de todos los efectos posibles de influencia, ambos natural o artificial, y sus cambios en tiempo y espacio (Linsley, 1977).

2.2.1.1 AGUA EN EL MEDIO DE ROCA

Según Mljailov, 1989, el agua nace de rocas unidas química y físicamente, que contienen minerales, y es un agua libre. Éste último puede tener el carácter de

gravedad o agua capilar. El término de aguas subterráneas incluye el agua de gravedad y el agua que ocurre en la franja capilar. El agua capilar suspendida se trata en pedología

El agua subterránea llena las aperturas de la roca que se diferencian por su tamaño y origen.

En base a su origen geológico y las características hidráulicas, que son tres tipos básicos, se diferencian de la siguiente manera:

1. Poros entre los granos de los sedimentos clásticos consolidados y no consolidados
2. Fracturas de diverso origen en roca consolidada
3. Cavidades de varios orígenes (e. g., cavidades de karst en roca soluble, canales de la lava, y aperturas de la mina). El agua subterránea en intersticios es afectada por las varias fuerzas del exterior (gravedad, presión de gas, presión osmótica, higroscopia fuerzas capilares)

El complejo de las leyes que controlan la circulación y las características del agua subterránea en una estructura hidrogeológica es conocido como **régimen**.

La capacidad de la roca para transmitir agua es llamada **permeabilidad o conductividad hidráulica**. Tomando en cuenta el tipo de abertura, podemos distinguir ya sea el tipo de poro, fractura y la cavidad permeable: análogamente, hablamos de poros, fracturas y karts en la hidrología subterránea.

El agua que llena una capa acuífera se le conoce como **cuerpo de agua**.

La superficie superior del agua es llamada **nivel de agua subterránea**.

Si la presión en la superficie de cuerpo de agua está encima el atmosférica (p. e., donde la capa acuífera es limitada por un acuitardo o estrato confinante), el agua subterránea es llamada **confinada**.

Los acuíferos y acuitardos son elementos geométricos importantes de la hidrogeología estructural.

2.2.1.2 TIPOS DE AGUA EN LAS ROCAS

El agua en las rocas se halla en estados diferentes y permanece en íntima conjugación con ellas. Prácticamente no hay roca que no contenga cierta cantidad de agua en una u otra forma o en estado de agregación: sólido, líquido y gaseoso. Diversas formas de agua pasan de una a otra, modificando asimismo las propiedades de las rocas, sobre todo de las arenosas.

En las rocas están presentes distintos tipos de agua a la vez. Además, las fronteras y relaciones entre ellas son convencionales y dependen de toda una serie de factores: composición mineralógica de la roca, grado de su dispersión, composición química del agua y las sustancias disueltas en ésta, temperatura del agua y las rocas, humedad y presión del aire, etc.

2.2.1.3 HUMEDAD Y PROPIEDADES HÍDRICAS DE LAS ROCAS

En condiciones naturales, las rocas siempre contienen cierta cantidad de agua. Además, en los suelos y rocas que yacen más arriba del nivel de las aguas subterráneas, el contenido de agua durante el año varía en función de los cambios estacionales de la temperatura, la presión y la humedad del aire, así como de la evaporación y las precipitaciones. Más abajo del nivel de las aguas subterráneas, la humedad de las rocas prácticamente permanece constante y es la máxima posible: Se distinguen la humedad de masa y la humedad de volumen o volumétrica.

La *humedad de masa* es la relación entre la masa del agua y la masa de la roca seca:

$$W_{\text{masa}} = [(g_{\text{hum}} - g_{\text{seca}}) / g_{\text{seca}}] \cdot 100,$$

Donde W_{masa} es la humedad de masa, en %; g_{hum} , la masa de la muestra de la roca de humedad natural, sometida a investigación, en g; y g_{seca} , la masa de esa misma roca secada a 105 - 106 °C, en g.

La *contenido de humedad* se expresa por el volumen de agua contenida en 1 cm³ de roca, y se determina por la fórmula:

$$W_y = W_{\text{masa}} / \gamma_p$$

Donde W_y es la humedad y γ_p , la densidad relativa de la roca seca, en g/cm³.

Además de los referidos índices de humedad natural de las rocas al realizar investigaciones hidrogeológicas también se determina el contenido de humedad relativa o el coeficiente de saturación de las mismas, así como su insuficiente saturación o el déficit de humedad.

Llámesese *coeficiente de saturación de la roca* K_w a la relación entre el contenido de humedad de una roca dada y el coeficiente de su porosidad:

$$K_w = W_y / n.$$

De la fórmula anterior se deduce que para una roca absolutamente seca, $K_w = 0$; y cuando los poros están completamente llenos de agua, $K_w = 1$. Según el coeficiente de saturación, las rocas arenosas se dividen en:

- 1) Arenas secas, cuando $0 < K_w < 1/3$.
- 2) Húmedas, cuando $1/3 < K_w < 2/3$.
- 3) Mojadas hasta la saturación, cuando $2/3 < K_w < 1$.

A las principales propiedades hídricas de las rocas pertenecen: la absorción de humedad, la devolución de agua, la permeabilidad y la capilaridad.

2.2.1.4 ELEMENTOS PRINCIPALES DE LA ESTRATIFICACIÓN HIDROGEOLÓGICA

La zona de saturación está integrada por rocas que difieren en cuanto a sus particularidades litológicas y a su edad geológica, las cuales se dividen en acuíferas, acuitardos (semiconfinantes) y confinantes (impermeables al agua).

Llámense rocas *acuíferas* las que contienen agua libre y que son capaces de dejarla pasar a través de todo su espesor y de entregarla con la relativa facilidad bajo la acción de la fuerza de la gravedad. A tales rocas pertenece a los guijarros, la gravilla, las areniscas y los conglomerados débilmente cementados, las arenas, las aleurolitas fisuradas y las calizas, así como las rocas magmáticas y metamórficas (Mijailov, 1989).

La categoría de rocas *confinantes* pertenecen las que pueden dejar pasar (filtrar) muy débilmente el agua o que no son capaces en absoluto de dejarla pasar y de entregarla en condiciones naturales. Tales rocas son las arcillas puras, las arcillas arenosas pesadas, la turba compacta bien descompuesta, los esquistos arcillosos,

las argilitas, la sal gema, el yeso, las margas, así como todas las rocas magmáticas y parte de las rocas metamórficas compactas y no fisuradas.

Las rocas acuíferas se agrupan en horizontes acuíferos, complejos acuíferos y pisos hidrogeológicos (Mijailov, 1989).

Por *horizonte acuífero* suele entenderse la serie de rocas de una misma edad o de edad diferente saturadas de agua gravitacional libre, de espesor y área uniformes y que, en sentido hidrodinámico. Representan un todo único. Lo más a menudo el horizonte acuífero se halla integrado por rocas homogéneas o rocas semejantes en cuanto a su composición litológica de facies y a sus propiedades de filtración. El mismo puede estar formado por una o por varias capas de rocas saturadas de agua; en el primer caso recibe el nombre de horizonte de una capa, y en el segundo, de horizonte complejo: de dos o de muchas capas.

Las rocas saturadas de agua que integran el horizonte acuífero deben tener una superficie hidráulica única: libre o piezométrica. Ese horizonte se halla aislado de los horizontes acuíferos supra y subyacentes, por rocas hidrófugas, lo cual no excluye, ni mucho menos, el enlace hidráulico entre algunos de ellos, por ejemplo, en los lugares de acuña miento de las rocas hidrófugas, o la presencia de <<ventana>> hidrogeológicas (fallas, zonas tectónicamente debilitadas, etc.).

El *complejo acuífero* es una potente serie de rocas saturadas de agua, de una misma edad o de edad y composición diferentes, de extensión regional y uniformes en el corte vertical, limitadas arriba y abajo por capas hidrófugas (o relativamente hidrófugas) de potencia regional mente uniforme, que excluyen casi por completo o dificultan el enlace hidráulico con los complejos adyacentes, garantizando ciertas singularidades (propias de un complejo dado) del régimen hidrodinámico e hidrogeoquímico de las aguas.

Cada complejo acuífero se caracteriza por determinada posición de las regiones de alimentación, de creación de la presión y de descarga. El mismo comprende varios

horizontes acuíferos. A diferencia de estos últimos, en el complejo acuífero, la presión de las aguas subterráneas puede variar en el corte vertical a consecuencia del diferente grado de enlace hidráulico de cada uno de los horizontes integrantes.

Por *piso hidrogeológico* se entiende el conjunto de complejos acuíferos limitados solamente abajo, o arriba y abajo, por potentes series de rocas hidrófugas regionalmente uniformes dentro de los límites del sistema de agua a presión. Los pisos hidrogeológicos difieren uno de otro por el grado de intercambio de agua, por las diversas particularidades del proceso de formación de las aguas subterráneas y por los distintos rasgos de desarrollo paleóhidrogeológico.

En el corte geológico constituido por rocas sedimentarias, metamórficas y magmáticas bien cementadas, que son formaciones fisuradas y cársticas de almacenamiento de aguas subterráneas, a menudo es imposible destacar los horizontes, los complejos y los pisos acuíferos. Tales rocas se distinguen por su fisuración irregular tanto en el área como en el corte. En las mismas suelen destacarse las *zonas acuíferas* cuya particularidad distintiva es su difusión local y la falta de enlace hidráulico entre ellas incluso dentro de los límites de una misma estructura tectónica.

Los horizontes y complejos-acuíferos, así como los pisos hidrogeológicos, poseen dimensiones diferentes tanto en el corte como en el plano, y se hallan separados uno de otro por series hidrófugas que difieren por su potencia, difusión uniforme en el área y el grado de permeabilidad de las rocas. Los menos uniformes en el plano regional son los horizontes acuíferos. En diversas partes de un mismo complejo acuífero puede haber distinta cantidad de horizontes acuíferos.

Dentro de los límites del sistema de agua a presión, los complejos acuíferos y, sobre todo, los pisos hidrogeológicos están más uniformemente difundidos y sus potencias son más estables. Las series hidrófugas que los separan se distinguen por ser más potentes y estar difundidas con más amplitud en el área.

2.3 HIDROLOGIA SUBTERRÁNEA

Es la parte de la hidrología que trata el almacenamiento y la circulación de las aguas terrestres en el subsuelo, sus propiedades físicas y químicas, su interacción con el medio físico y biológico y sus reacciones a la acción humana (Saint, 1975).

El agua subterránea puede dividirse en dos zonas por tener diferente comportamiento y pertenecer a diferentes áreas de interés: estas zonas son la de aeración y la saturada. La primera va desde el nivel de la superficie del terreno hasta la superficie freática, que es aquella donde las partículas de agua tienen la presión atmosférica. En la zona de aeración actúan fuerzas capilares que disminuyen la presión del agua. La zona saturada está bajo el nivel freático con presiones mayores que la atmosférica. Esta zona es la de mayor interés en la hidrología subterránea (Saint, 1975).

El agua subterránea es relativamente libre de contaminación y es particularmente útil para uso doméstico en pueblos pequeños y granjas aisladas. En regiones áridas frecuentemente es la única fuente de abastecimiento para irrigación.

Las temperaturas de las aguas subterráneas son relativamente bajas, por lo que se utilizan para enfriamiento en zonas cálidas (Saint, 1975).

Se sabe que casi toda el agua subterránea es *agua meteórica* ya que proviene de la precipitación.

Existe también el *agua de formación*, la cual está presente en la roca durante su formación o deposición, generalmente es de alto contenido salino.

En menores cantidades se encuentra el agua llamada agua juvenil que se formó dentro del subsuelo y es llevada a la superficie por rocas intrusivas (Linsley, 1977).

Para proteger el agua subterránea de contaminación, primero hay que identificar los sitios de cambios repentinos o graduales en las propiedades fisicoquímicas del agua subterránea que hayan ocurrido. En casos donde la producción de capa acuífera es amenazada o las condiciones hidrodinámicas han sufrido cambios marcados, se proponen reservas crecientes de agua, basadas en resultados de investigaciones hidrogeológicas. La principal tarea para ser lograda en la investigación hidrogeológica son las siguientes:

- 1) Establezca el tamaño y el carácter de las estructuras de hidrogeológica.
- 2) Identificación de interrelaciones entre varios factores de influencia del agua subterránea en tiempo y espacio.
- 3) Recomendar métodos regular en base de los criterios dados (geológica, técnica, económica, etc.).

2.3.1 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA SUBTERRÁNEA

El agua tiene propiedades y características físicas que difieren notablemente de los minerales de roca que lo forman. Las propiedades importantes del agua se deben a la total mineralización y a la radiactividad. Davis y De Wiest (1996) listan 34 radioisótopos que pueden estar presentes en el agua subterránea, pero sólo U^{235} , U^{238} , Ra^{226} , Ra^{228} , Rn^{222} , K^{40} , h^3 , Cl^{36} , y C^{14} ocurren en una forma ascendente.

.2.1.1 CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

A elaborar la clasificación de las aguas subterráneas se dedicaron muchos científicos, quienes propusieron (en tiempos diferentes) diversas clasificaciones, pero hasta hoy día no existe una clasificación única que refleje todas las propiedades de

las aguas subterráneas. Ello se explica por el hecho de que su creación representa una tarea extraordinariamente difícil, condicionada por numerosos factores naturales y artificiales que ejercen influencia sobre las aguas subterráneas; por la gran variedad de condiciones geológicas de su yacimiento; por su movimiento continuo y diferente, que conduce a la modificación y renovación constante de las aguas subterráneas.

En la mayoría de las clasificaciones, las aguas subterráneas se dividen en tipos y variedades según la composición química y la mineralización, el origen y las condiciones de yacimiento, el carácter de las rocas acuíferas, las propiedades hídricas, el régimen de movimiento, la zona climática de yacimiento, la temperatura y otros indicios.

Con respecto al origen, las aguas subterráneas se dividen en cinco variedades:

- 1) Infiltración
- 2) Condensación
- 3) Sedimentación
- 4) Juveniles
- 5) Regeneradas (de deshidratación).

Según las condiciones de yacimiento y el carácter de las rocas acuíferas, las aguas subterráneas se dividen en:

- 1) Aguas intersticiales, que yacen y circulan en los horizontes del suelo y en los depósitos friables, diferentes en cuanto a su origen, granulometría y composición mineralógica. y de manto principalmente cuaternario.
- 2) Aguas de capa, que yacen y circulan en las capas de rocas sedimentarias y que se subdividen en aguas intersticiales de capa y aguas de fisura de capa.
- 3) Aguas de fisura, que yacen y circulan en las rocas sedimentarias, magmáticas y metamórficas compactas, atravesadas por fisuras de meteorización.

- 4) Aguas filonianas de fisura, que yacen y circulan en ciertas grietas tectónicas abiertas y en las zonas de trastornos tectónicos.

Ateniéndose a las propiedades hidráulicas, las aguas subterráneas se dividen en aguas a presión (o bajo presión) y aguas sin presión.

Según los factores climáticos que determinan en sumo grado el régimen de las aguas subterráneas, es decir, la variación (en función del tiempo) del rendimiento de los horizontes acuíferos, la composición, la temperatura y el nivel de dichas aguas, éstas se dividen en zonales, azonales e intrazonales. A las zonales pertenecen las aguas subterráneas cuyo régimen se determina de acuerdo con el clima (las aguas de los horizontes acuíferos superiores que permanecen bajo presión o sin presión); y a las azonales, las aguas que se encuentran en cualquier zona climática, pero que poseen sus particularidades específicas (Mijailov, 1989).

.3.1.1 PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.

A las propiedades físicas de las aguas naturales, que se estudian al realizar investigaciones hidrogeológicas. Pertenecen la temperatura, la transparencia, el color, el olor, el sabor, la densidad y la viscosidad. Algunos de estos índices del agua (temperatura, transparencia, color, olor y sabor) poseen propiedades organolépticas, es decir, son muy bien percibidos por los órganos de los sentidos del hombre.

.4.1.1 DIVISIÓN DE LA HIDROSFERA SUBTERRÁNEA EN ZONAS HIDROFÍSICAS

Tal división se basa en la transición del agua de un estado a otro y en los cambios característicos de su estructura. Según el estado de fase y segregación del agua en la hidrosfera subterránea, se destacan las siguientes zonas hidrofísicas:

- 1) Aireación.
- 2) Permafrost (zona eternamente congelada de la corteza terrestre).
- 3) Saturación.
- 4) Fluido acidoso excesivamente compactado.
- 5) Solución acuosa en forma de fluido plástico de silicatos y aluminosilicatos
- 6) Moléculas de agua disociadas.

Las tres primeras zonas son las mejor estudiadas. La *zona de aireación* comprende las capas superiores de la litosfera, desde la superficie de la tierra hasta el nivel de las aguas freáticas. Aquí los poros de las rocas suelen estar llenos de gases de origen atmosférico y bioquímico, así como de vapores de agua y de agua capilar friable y fuertemente enlazada. De modo periódico, en la primavera, en el período de fusión de la nieve o en la temporada de lluvias intensas, en las rocas de la zona de aireación se forma agua libre (gravitacional).

La frontera superior de la zona de aireación prácticamente es constante, su posición en el espacio puede variar tan sólo a consecuencia de ciertos procesos endógenos y exógenos (movimientos tectónicos, influencia de la erosión y acumulación, acción de los glaciares, etc.) y la intensa actividad económica del hombre. La frontera inferior de la zona de aireación es más variable, ya que su posición se determina con arreglo a la superficie de las aguas freáticas, la cual oscila bajo la influencia de factores artificiales y naturales. La potencia de la zona de aireación depende de las particularidades litológicas de las rocas (profundidad de yacimiento de las capas

impermeables), del relieve de la región, del grado de desigualdad de la superficie de la tierra y de las condiciones climáticas (cantidad de precipitaciones atmosféricas e infiltración). La misma varía desde valores nulos en las llanuras pantanosas, hasta decenas y centenas de metros en los desiertos y en las regiones montañosas de relieve muy accidentado.

La *zona de permafrost* limita por abajo con la isoterma de transición de fase hielo-agua y tiene una potencia de 1000 m y más. Esta zona se distingue por la difusión predominante de las aguas subterráneas en fase sólida. La misma ocupa las vastas regiones septentrionales de Eurasia, América y la Antártida, así como los territorios de alta montaña de las formaciones montañosas plegadas.

En la zona de permafrost reinan temperaturas negativas, de 0 a -15 °C, que son una reliquia de las rigurosas condiciones climáticas del pasado y la época actual. Además de las aguas subterráneas en fase sólida, aquí se encuentran aguas líquidas, frecuentemente muy mineralizadas y de temperatura negativa.

La *zona de saturación* (de aguas líquidas) yace entre las isotermas de las transiciones de fase hielo-agua y agua-vapor y está difundida en todas partes. Su particularidad es que las fisuras y los poros de las rocas integrantes, permanecen completamente llenos (saturados) de agua libre de constitución.

2.4 GEOFISICA.

2.4.1 METODOS GEOFISICOS.

Existen una amplia gama de métodos geofísicos, los más utilizables para la hidrología subterránea según King (1999), son:

- Método de resistividad eléctrica
- Método sísmico de refracción
- Perforaciones de exploración
- Fotografías aéreas de luz infrarroja

- Radar y ondas electromagnéticas
- Método gravimétrico
- Método sísmico de reflexión
- Medición de temperatura del suelo
- Trazadores.

2.4.2 TEORIA DE LA PROSPECCION ELÈCTRICA POR RESISTIVIDADES.

Los métodos eléctricos, en los que la corriente se aplica al suelo conductivamente por medio de electrodos, tienen su fundamento en el hecho de que las variaciones en la conductividad del subsuelo alteran el flujo de corriente en el interior de la tierra, lo que se traduce en una variación de la distribución del potencial eléctrico. El mayor o menor grado de alteración del potencial eléctrico en la superficie del terreno según King (1999), depende del tamaño, forma, localización y resistividad eléctrica del suelo.

Usualmente, la corriente penetra en el terreno a través de dos electrodos y se mide la caída mediante un segundo par de electrodos situados entre los anteriores y alineados con ellos. A partir de los valores medidos de la intensidad de corriente inyectada al terreno, la caída de potencial y de la separación entre los electrodos puede determinarse el valor de una nueva magnitud: la resistividad aparente.

El análisis de la variación del valor de la resistividad aparente para distintas separaciones ínter electrónicas permite obtener interesantes conclusiones acerca de la estructura del subsuelo.

La conducción eléctrica en la mayoría de las rocas es esencialmente electrolítica, por lo que la conducción eléctrica se realiza a través del agua intersticial que

normalmente contienen y que siempre tiene, en mayor o menor grado, sales disueltas que la hacen conductora.

En el caso de los sulfuros metálicos y, en el más general, de las rocas que contienen una cierta proporción de arcilla esto no es absolutamente cierto, ya que estos minerales toman parte en el proceso de conducción.

En las rocas cristalinas por su baja porosidad, la conducción eléctrica se efectúa principalmente a lo largo de grietas y fisura, por lo que, a igualdad de los demás factores que influyen en ella, su resistividad será inversamente proporcional a la abundancia de ellas. De hecho, en este tipo de rocas, el grado de fisuración es el factor que más influye en su resistividad.

Hay que señalar que la resistividad de cualquier formación varía entre amplios límites, no ya solo de una zona a otra, sino incluso dentro de una misma zona, esto es particularmente cierto cuando se trata de formaciones superficiales no consolidadas, pueden establecerse criterios de tipo general, tales como el que la resistividad de las formaciones crece en el orden siguiente: arcilla, arena, grava y caliza; las rocas cristalinas tienen resistividades aun mayores. En formaciones parcialmente secas la resistividad puede aumentar diez, incluso más veces.

2.4.3 TEORIA DEL FLUJO DE LA CORRIENTE.

2.4.3.1 MEDIOS CONTINUOS.

Con objeto de poder hacer una interpretación cuantitativa de las mediciones efectuadas, se considera el subsuelo como un conjunto de capas de resistividades iguales dentro de cada una de ellas y distintas entre si y superpuestas unas a otras y separadas por planos paralelos. Para un buen conocimiento de lo que es el problema de la interpretación, es necesario conocer el comportamiento del flujo de

corriente en medios estratificados, y el modo en que este comportamiento afecta a la distribución del potencial.

2.4.4 SISTEMAS DE MEDICION POR CUATRO ELECTRODOS.

Se ha considerado hasta ahora el potencial en las proximidades de un electrodo fuente positivo.

Si el electrodo por el que la corriente fluye al terreno se considera positivo y se denomina fuente, entonces el otro será negativo y constituirá lo que se llama un sumidero. El potencial debido a ambos electrodos en un punto cualquiera será simplemente la suma del potencial positivo debido a la fuente y del negativo debido al sumidero.

Desgraciadamente existe un límite para la separación real de los electrodos de potencial, ya que si esta distancia se reduce en demasía resulta extremadamente difícil medir la diferencia de potencial con suficiente exactitud.

Otro factor que en la práctica limita esta separación mínima es la heterogeneidad lateral de la capa superficial, que puede producir amplias y rápidas variaciones en el valor del gradiente del potencial.

También es de gran importancia que los electrodos de potencial y los de corriente no estén demasiado cerca unos de otros, ya que en las proximidades de los electrodos de corriente los gradientes de potencial son anómalamente elevados, lo que se traduce en que cualquier medida de la diferencia de potencial tomada en esta zona se vería afectada por cualquier inhomogeneidad en la resistividad.

2.4.4.1 MEDICIONES CON SEPARACIÓN CONSTANTE DE ELECTRODOS.

Teóricamente, el problema de determinar el espesor de una capa en un subsuelo estratificado horizontalmente, es de los más sencillos porque la resistividad varía

únicamente en una dirección, la vertical. El problema se resuelve en principio, efectuando una serie de mediciones con distancias interelectrónicas progresivamente crecientes, manteniendo siempre fijo el centro del dispositivo.

Cuando en el terreno existen dos interfaces verticales, el problema es más complicado porque el efecto conjunto de ambas se traduce en la aparición de infinitas imágenes de la fuente y el sumidero.

2.4.5 SONDEO ELÉCTRICO Y SU INTERPRETACIÓN.

2.4.5.1 INSTRUMENTOS.

Casi toda la prospección eléctrica por resistividades se efectúa con instrumentos que generan corriente continua, esto se debe a que las fuerzas electromotrices de carácter electroquímico que se originan en los contactos entre los electrodos metálicos y el suelo causarían errores en las lecturas y a las corrientes naturales que circulan por el interior de la tierra.

Como las diferencias de potencial de origen electroquímico y las corrientes telúricas tienden a ser unidireccionales, ambas se eliminan si se aplica al terreno corriente alterna.

Es muy conveniente el empleo de corriente alterna de baja frecuencia, ya que de no ser así las resistividades aparentes observadas pueden diferir de las obtenidas empleando corriente continúa.

2.4.5.2 INTERPRETACION.

Los resultados de una prospección de resistividad pueden representarse de muy diversas formas. Si las mediciones se han efectuado en varias estaciones empleando un dispositivo electrodo con separaciones entre ellos progresivamente crecientes,

los resultados se representan normalmente en una serie de gráficos que expresan la variación de la resistividad con la profundidad aparente en el aumento de la distancia interelectródica.

En otros tipos de investigación, las mediciones se efectúan con una separación interelectródica, constante, o bien a lo largo de un cierto número de perfiles, bien formando una red. Entonces los resultados se representan en forma de gráficos de variación de la resistividad aparente a lo largo de perfiles o como un mapa en el que figuran las líneas de igual resistividad aparente.

2.4.5.3 TRABAJO DE CAMPO.

La finalidad de una prospección es obtener la información tan rápida y económicamente como sea posible. La información debe tener la suficiente exactitud para el propósito requerido y debe ser lo bastante amplia, aunque no mas de lo necesario como para permitir efectuar una interpretación correcta del problema.

Antes de comenzar cualquier trabajo es de gran importancia tener información geológica complementaria de la zona a partir de los datos de uno o más sondeos mecánicos.

La hidrogeología y la ingeniería geológica son ciencias aplicadas. En la práctica, ellos principalmente usan el conocimiento y datos proporcionados por estudios geológicos, físicos, químicos, matemáticos y biológicos.

Los métodos que se utilizan en geofísica se dividen dependiendo de su carácter moderado de uso en el campo (gravimétrico, magnetométrico, geotermal, geoelectrico, radiometrico, geofísica nuclear, métodos sísmicos y acústicos).

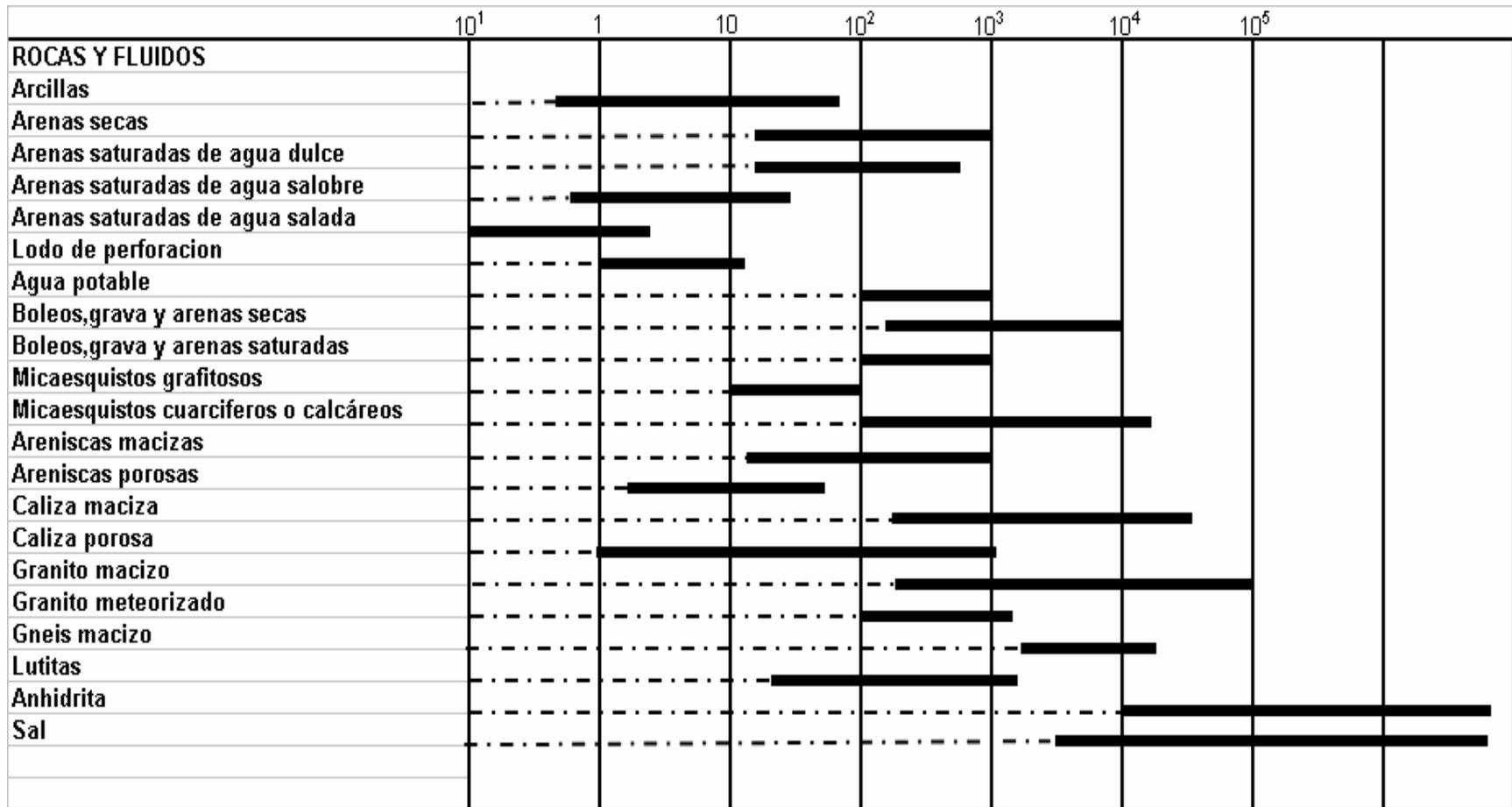
Otro factor que debe ser reconocido y entendido es la relación entre las propiedades físicas de la roca y la hidrogeología y parámetros geofísicos-geológicos. El principal

beneficio de los métodos geofísicos es que se obtiene de ellos valores de alta calidad y confiabilidad para su utilización.

2.5 METODO ELECTRICO RESISTIVO

El método de resistividad se basa en medir desde la superficie del terreno los cambios de resistividad de los diferentes estratos o unidades geológicas del subsuelo.

La resistividad de un cierto material se define como la resistencia eléctrica de un cubo de dicho material de 1 m de lado, cuando hacemos pasar a través de él una corriente perpendicular a una de sus caras. La resistividad de las rocas (Tabla 1) depende de varios factores para que se le pueda atribuir un valor, por eso es necesario en los estudios geoelectricos contar con información tal como cortes litológicos de pozos, registros de pozos, mapas geológicos, etc. Con el fin de reducir el margen de variación y poder identificar las rocas por su resistividad, aunque en algunos casos puedan existir ambigüedades. Los principales factores que afectan las resistividades de las rocas son: Porosidad, constitución mineralógica, grado de saturación, la resistividad del agua contenida.



Según M. Méndez Arocha, citado por Canales, 1999

Tabla 1. Resistividades de diferentes materiales

2.5.1 ELECTRODOS.

Uno de los elementos esenciales de las instalaciones destinadas a las mediciones geoelectricas son los electrodos: se define como electrodos a las “barras metálicas” con las cuales se hace contacto con el terreno. Los electrodos de corriente A Y B (mediante los cuales se introduce la corriente al terreno) pueden consistir en barras de acero inoxidable, de unos 70 cm., de largo con algún medio (como clip de batería) para conectar el extremo desnudo del cable que va a la fuente de energía.

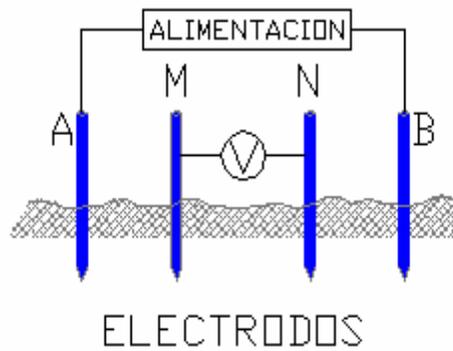
Normalmente se consiguen contactos eléctricos satisfactorios en terreno relativamente húmedo, cuando los electrodos penetran de 10 a 20 cm. En el terreno.

En zonas secas el contacto puede ser mejorado regando el sitio donde se colocan los electrodos (con agua con sal).

Los electrodos de potencial M y N (barras mediante las cuales se registran la diferencia de potencial, a veces llamadas “sondas” pueden estar constituidos también por varillas de acero inoxidable o cobre (Fig. 1).

Aunque en algunos casos las barras metálicas de cobre, resultan satisfactorias para medir el potencial, en otros casos no es recomendable su empleo directo pues la acción electrolítica produce una diferencia de potencial variable entre dos electrodos metálicos clavados en el suelo. Este fenómeno llamado **polarización** tiende enmascara la diferencia de potencial natural entre los electrodos. Por esto es preferible utilizar (sobre todo para el método de potencial espontáneo) los electrodos impolarizables en la línea de medición (de potencial).

Figura 1. Arreglo de electrodos para sondeos eléctricos verticales



Fuente: Camarena citado por Canales,1999.

2.5.2 CONFIGURACIONES ELECTRODICAS.

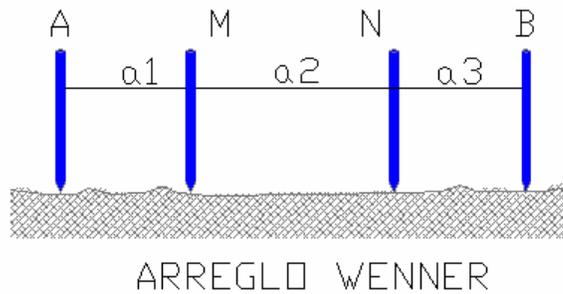
Para determinar la resistividad de un terreno homogéneo se han sugerido varios arreglos de electrodos, para A, B, M, y N. Los más comúnmente usados son:

1. Arreglos simétricos y
2. Arreglos dipolares

En el arreglo simétrico, los puntos A, M, N, y B se toman en cuenta en una línea recta de manera que los puntos M y N sean simétricos con respecto al centro "O" del tendido AB.

Dentro de este tipo de arreglo se encuentra el dispositivo Wenner en el cual los electrodos se colocan equidistantes, de manera que se obtenga $a_1 = a_2 = a_3$ (Ver Fig. 2).

Figura 2. Arreglo Wenner

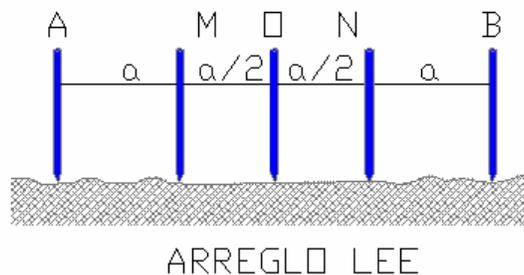


Fuente: Camarena citado por Canales,1999.

En ocasiones se utiliza un arreglo denominado Lee, el cual es una modificación del Wenner.

El arreglo Lee consiste en colocar en el punto "O" un tercer electrodo de medición (Ver Fig. 3), obteniéndose para cada uno dos medidas de diferencia de potencial, MO y ON.

Figura 3. Arreglo Lee



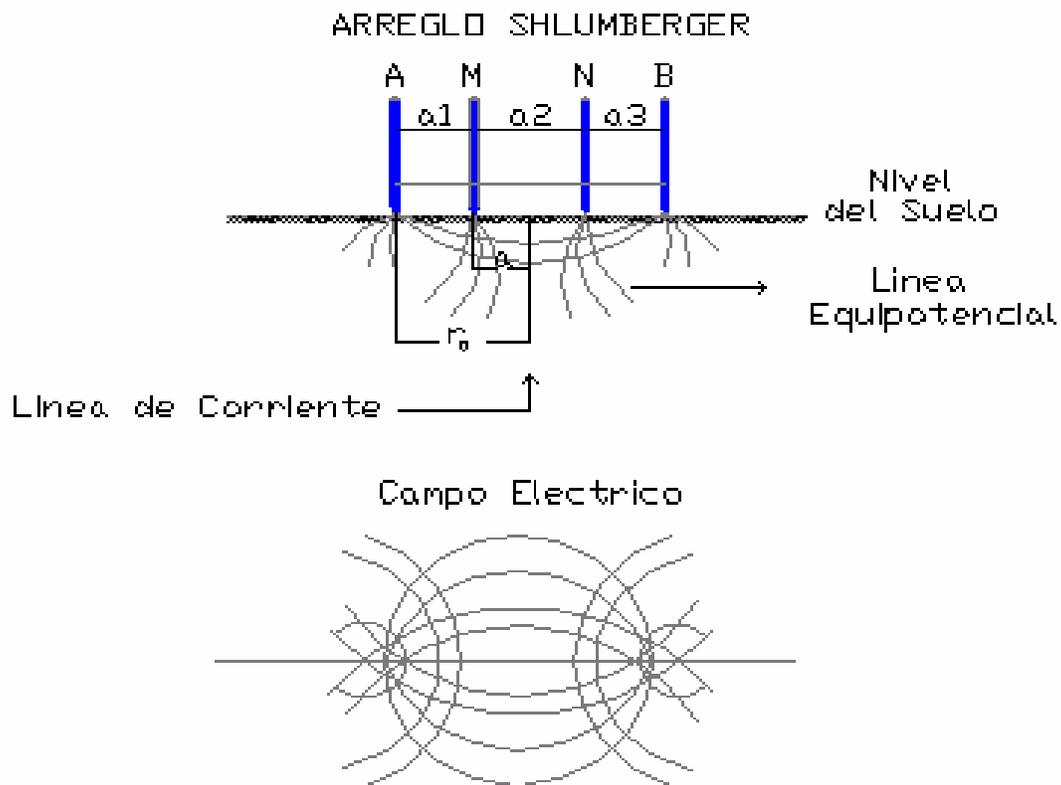
Fuente: Camarena citado por Canales,1999.

El arreglo Schlumberger es otro de los dispositivos simétricos. En este, las distancias a_1 y a_3 son iguales y muy grandes en comparación de a_2 (Ver Fig. 4).

En la práctica se mantendrá la relación: $5 < AB/mn < 20$. La resistividad viene dada por:

$$\rho = \pi \frac{AM \cdot AN \cdot \Delta V}{dN} \text{ o sea } \rho = \pi \frac{(r_0 - a^2) \Delta V}{2^a}$$

Figura 4. Arreglo Schlumberger



Fuente: Camarena citado por Canales, 1999.

2.6 SONDEO ELECTRICO VERTICAL.

En la exploración geofísica se emplea el método eléctrico de resistividades, en su modalidad de Sondeo Eléctrico Vertical, con una distribución de electrodos correspondiente al dispositivo SCHLUMBERGER. Con este dispositivo, al ir expandiendo sucesivamente los electrodos de corriente (A y B) se va obteniendo información de estratos cada vez más profundos. Las mediciones de campo aplicando el método del SEV, consisten en determinar las resistividades aparentes que corresponden a una serie creciente de separaciones entre electrodos. Teniendo por base el hecho de que a mayor distancia entre los electrodos de potencial y de corriente, corresponde mayor profundidad de investigación.

Los resultados obtenidos por el SEV, utilizando cualquiera de los dispositivos electródicos antes descritos se llevan a una grafica que recibe el nombre de curva de resistividad aparente. Se dibujan en un sistema de coordenadas rectangulares, ya sea utilizando escalas matemáticas o logarítmicas, una serie de puntos llevando en las ordenadas de los valores de resistividad aparente y en las abscisas la mitad de la distancia entre los electrodos de corriente $AB/2$, cuando se utiliza el dispositivo Schlumberger o R (que es la distancia que une los centros de los dos dipolos) en los arreglos dipolares y en el método Wenner se toma como abscisa la distancia equielectródica "a".

La resistividad verdadera y los espesores de cada uno de los estratos de determinada zona se pueden calcular a partir de las curvas de resistividad aparente. Con este propósito se han propuesto y desarrollado diversos métodos de interpretación que se basan en el análisis de la distribución del potencial en la superficie, producido por una corriente al atravesar estratos de diferentes resistividades. Estos métodos, unos analíticos y otros gráficos, permiten

establecer las condiciones y profundidades de los estratos desde el punto de vista eléctrico, pero debe señalarse que no obligatoriamente hay una correspondencia unívoca entre las unidades eléctricas y geológicas para obtener una adecuada interpretación cuantitativa es necesario contar con información geológica, tanto de la superficie como del subsuelo.

2.6.1 INTERPRETACIÓN DE LAS CURVA DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES (SEV).

El objetivo principal de la interpretación de las curvas de los SEV es la construcción del corte geoelectrico del área estudiada. Para ello con base en dichas curvas se determinan los espesores y las resistividades reales de las diferentes capas que componen la zona de estudio. La interpretación geológica del corte geoelectrico se efectúa relacionando las propiedades eléctricas con la geología de la zona.

Se puede considerar que la interpretación se divide en dos partes:

1. Interpretación cualitativa.
2. Interpretación cuantitativa.

Interpretación cualitativa:

La Interpretación cualitativa tiene como fin:

- a. Dar una idea general sobre la composición geológica.
- b. Determinar cualitativamente los cambios de facies de diferentes horizontes.

El análisis cualitativo se puede llevar a cabo por medio de las resistividades aparentes y sus isolíneas siendo necesario construir una gráfica por cada sondeo, con valores de ρ y la separación creciente de electrodos.

Interpretación cuantitativa:

El objetivo de la interpretación cuantitativa tiene por objeto la determinación de los espesores y resistividades verdaderas de las capas geoelectricas del corte para posteriormente con ayuda de los conocimientos geológicos de la zona que se posean, dar significado litológico a cada una de ellas.

3 MATERIALES Y METODOS.

3.1 Zona de estudio.

La zona de estudio se localiza entre el Valle del Yaqui (Fig. 5), la cual colinda al suroeste con la línea de la costa del golfo de California y que corresponde a una área agrícola de 6x12 km, concentrándose con mayor detalle en los Block's 2206 y 2104 (Ver. Fig. 6).

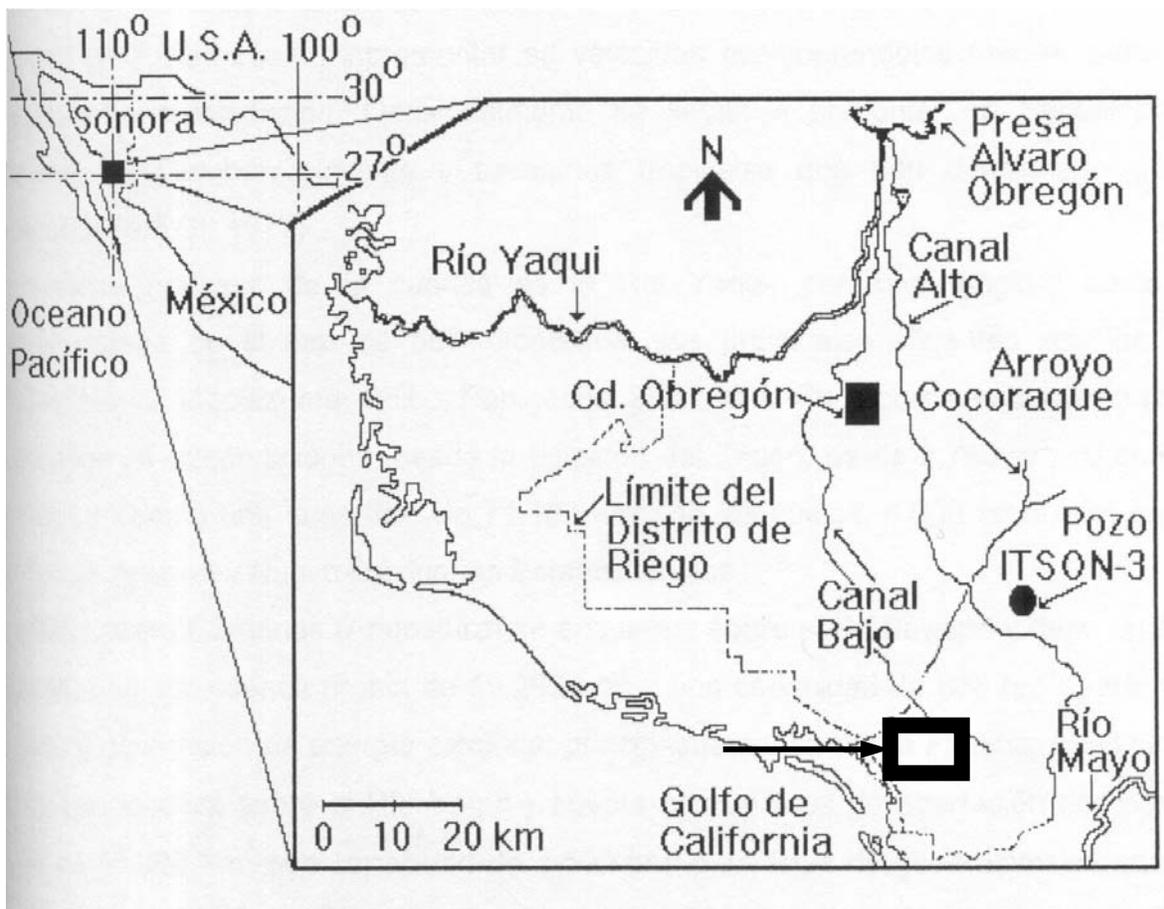


Fig. 5. Localización del Valle del Yaqui, sonora

3.2 Materiales.

El material utilizado en el campo fue: 4 carretes con rollo de cable eléctrico No. 10, 3 marros de 1.5 lb, 4 electrodos de acero inoxidable.

El equipo que se utilizó fueron: 4 transmisores de Banda Corta marca: Motorola, modelo: fr50, Medidor de Resistividad de Terreno Sting R1, Geoposicionador Global (GPS) marca: Garmin, modelo: Etrex, automóvil Pick up Nissan modelo 2003,

El hardware y software utilizado fue: computadora persona Modelo: brain Pentium 4 Marca: Lanix, Ploter Design 500ps, Excel XP, Word XP, IXRes 1.00, Surfer Ver. 7.

En estos programas se capturaron los datos obtenidos en campo para dar formato e interpretación de resultados.

3.3 Metodología.

Se procedió ir a campo y tomar lectura de la resistividad con el Medidor de Resistividad de Terreno Sting R1 para los materiales que constituyen la litoestratigrafía y la salinidad del agua subterránea que satura esos materiales

Ya obtenidas las lecturas del Medidor de Resistividades se trabajo en gabinete, capturando los datos en una Hoja de Cálculo del software Excel; utilizando los datos se obtuvieron las coordenadas del área de estudio, las resistividades de los materiales por capas que se pudieran presentar en la zona en estudio.

El software IXRes 1.00, se aplicó para determinar la confiabilidad de los datos con un porcentaje de error lo mas mínimo posible. Este programa utiliza regresiones lineales como la inversión de Occam (eGroot-Hedlin, 1990) que intenta reducir al mínimo el cambio de la brusquedad del modelo y la regresión de Canto (Inman, 1975) que intenta el más idóneo ordenamiento de los datos reduciendo al mínimo el cambio del modelo.

El software Surfer Ver. 7 se utilizó para mapear los resultados obtenidos con anterioridad, como la topografía del terreno y cada una de las capas a la profundidad que se requerían para dicho estudio, así como la presentación de las resistividades con diferencias de colores para una mejor interpretación.

El software Word XP se empleo para la elaboración del reporte.

Para la zona de estudio a detalle se realizaron 30 sondeos eléctricos verticales (SEV's) (Figura No.7), distribuidos en toda el área de estudio, con arreglo Schlumberger, explorando hasta 450 m de profundidad, con separación entre estaciones de sondeos no mayores a 200 m en la zona de mayor detalle, y menos de 500 m en el resto de la zona de estudio, también se incluyeron tres SEV's realizados por el ITSON en febrero de 2001 ubicados a 3 km. de la zona de estudio, dando un total de 33 sev's (Fig.6), los cuales se utilizaron para dar un panorama regional de las diferentes litoestratigrafías presentes en los alrededores de la zona detallada, ubicada en una sección del Block 2104 y otra sección del Block 2206.

A fin de obtener mejores resultados, se incluyeron en el proceso de interpretación SEV's, los cuales se ubicaron en las proximidades del pozo P132 situado en las coordenadas 605001 al este, 3001646 al norte; y también se utilizó el registro eléctrico de un pozo de reciente perforación de Agrícola Cocoraque S.P.R. de R.L (RZ2206-20) ubicado en las coordenadas 603774 al este 3000883 al norte, para correlacionar los cortes litológicos de los pozos, con las resistividades de los SEV's, los cuales se presentan en la Tabla 2 respectivamente.

Por su correlación entre rangos de resistividad, tipos de material geológico y la salinidad del agua se identifican 5 unidades geoelectricas, las cuales aparecen en la Tabla 3.

Tabla 2. Materiales litológicos de los pozos RZ 2206-20 y P132.

Pozo	Elev.	Elev.		Profundidad		Material	Resistividad ohms-m
	msnm	(msnm)		m			
RZ	3						
		3	-15	0	18	Arcilla	2 – 12
		-15	-74	18	77	Arenas y gravillas	2 - 3
		-74	-97	77	100	Arcillas, arenas y gravillas	3 – 4
		-97	-108	100	111	Gravas, gravillas y arenas	4 - 5
		-108	-127	111	130	Arenas con arcilla	5 - 6
		-127	-205	130	208	Arenas y gravillas	6 - 9
132	6						
		6	-0.1	0	6.10	Arena fina	4
		-0.1	-3.2	6.1	9.15	Arena fina y arcilla	4 - 5
		-3.2	-6.2	9.2	12.20	Arena fina	5
		-6.2	-24.5	12.2	30.50	Arcilla	5 - 8
		-24.5	-33.7	30.5	39.70	Caliza	7
		-33.7	-45.9	39.7	51.90	Arena con arcilla	7 - 9
		-45.9	-48.9	51.9	54.90	Grava con arcilla	6
		-48.9	-67.2	54.9	73.20	Arcilla	6 - 7
		-67.2	-79.5	73.2	85.50	Arcilla con arena	8
		-79.5	-88.5	85.5	94.50	Caliza con arena fina	8
		-88.5	-94.5	94.5	100.50	Arcilla con arena	8 - 9
		-94.5	-101.0	100.5	107.00	Gravilla con arena	9
		-101.0	-104.0	107.0	110.00	Gravilla	9
		-104.0	-110.0	110.0	116.00	Gravilla con arena	9
		-110.0	-113.0	116.0	119.00	Arcilla con gravilla	9
		-113.0	-116.0	119.0	122.00	Arcilla	9

		-116.0	-125.5	122.0	131.50	Arcilla y arena	9 - 10
		-125.5	-130.0	131.5	136.00	Arena	10
		-130.0	-134.5	136.0	140.50	Arena y gravilla	10 - 11
		-134.5	-137.5	140.5	143.50	Arena gruesa	11
		-137.5	-140.5	143.5	146.50	Arena y gravilla	11
		-140.5	-153.0	146.5	159.00	Arcilla y arena	11 - 12
		-153.0	-159.0	159.0	165.00	Arena y gravilla	12
		-159.0	-167.8	165.0	173.80	Arena fina y caliza	12 - 13
		-167.8	-177.0	173.8	183.00	Arcilla y arena	13 - 14
		-177.0	-183.0	183.0	189.00	Gravilla y arena	14
		-183.0	-210.5	189.0	216.50	Arcilla y arena	14 - 16

Fuente: Canales, *et al* (2003).

Tabla 3. Resistividad de materiales y agua de saturación, y su correlación litoestratigráfica.

Unidad Geoeléctrica	Resistividad (Ohm-m)	Correlación
U1a	<6	Materiales granulares finos a medianos, saturados posiblemente con agua salada de alto riesgo para uso agrícola.
U1b	6 a 10	Materiales granulares finos a medianos, saturados posiblemente con agua salobre, de uso solo para cultivos muy tolerantes y suelos agrícolas arenosos.
U1c	10 a 30	Materiales granulares finos a gruesos y/o roca fracturada, saturados posiblemente con agua dulce a salobre, de uso restringido en algunos cultivos muy sensibles a sales.
U2a	30 a 110	Materiales granulares finos a gruesos, posiblemente con agua dulce, de uso sin restricciones de suelos y cultivos.
U2b	>110	Materiales granulares gruesos, posiblemente con agua dulce y/o roca consolidada.

Fuente: ITSON 2000, Estudio y Actualización Hidrogeológica en los Acuíferos de los Valles de: el Yaqui, el Mayo, Boca Abierta y Guaymas, Sonora.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las figuras desde la 7 a 28 muestran un panorama regional apoyado en 33 SEV's, concentrando mayor detalle en la zona generada por los 30 SEV's realizados en el Block 2104 y Block 2206.

Los resultados fueron mapeados y se presentan mediante planos en planta a cada 5 m, para elevaciones desde -0 msnm hasta -10 msnm. (Figuras 7 a 9), cada 10 m para elevaciones desde -10 msnm hasta -100 msnm. (Figuras 9 a 18) y a cada 20 m, para elevaciones desde -100 a -300 msnm. (Figuras 18 a 28).

Cabe señalar que estos resultados quedan sujetos a comprobación en tanto no se disponga de las muestras y resistividades de pozos de perforación, así como registros eléctricos y de la conductividad eléctrica del agua que se obtenga.

Topografía de la zona y localización de Sev's.

La Figura 6, muestra el perímetro de las zonas de mayor detalle con la localización de los SEV's, y la topografía de la zona de estudio.

La topografía de la zona muestra una pendiente muy plana en dirección noreste a suroeste hacia la costa, presentando un rango de 4 a 15 msnm (Figura.6).

Resistividad estratificada entre 0 msnm y -40 msnm (Figura 7 a 12).

Se identifican desde 0 a -40 msnm la presencia muy reducida y aislada de resistividades de 30 Ω -m. Se observan en la zona en predominio resistividades menores a 6 Ω -m.

Las resistividades se referencian a la Tabla 3.

Resistividad estratificada entre -50 msnm y -100 msnm (Figuras 13 a 18).

Se observa en la Figura 13 y 14 una área poco significativa desde -50 a -60 msnm resistividades entre 110 y 500 Ω -m correspondientes a basamentos o roca cristalina, de -70 a -100 msnm se encuentran según Figuras 15 a 18, resistividades de 70 Ω -m. En este estrato predominan resistividades menores de 10 Ω -m, Solo una zona del Block 2206 es factible para la explotación agrícola, el resto de la región no es adecuada para este fin. (Ver Tabla 3 para resistividades).

Resistividad estratificada entre -120 msnm y -140 msnm (Figuras 19 y 20).

En ambas figuras se observa una zona muy reducida con resistividad de 10 Ω -m. Una gran proporción de la zona presenta resistividades de 2 a 6 y de 6 a 10 Ω -m asociadas con materiales granulares finos a medianos, saturados posiblemente con agua salobre respectivamente, de uso solo para cultivos muy tolerantes y suelos agrícolas arenosos. Este estrato no es favorable para la explotación agrícola. Las resistividades se referencian a la Tabla 3.

Resistividad estratificada entre -160 msnm y -260 msnm (Figuras 21 a 26).

En esta zona se observan resistividades entre 30 y 70 Ω -m. Predominan en el área total de estudio resistividades entre 10 y 30 Ω -m. Este estrato es favorable para la explotación agrícola en los Blocks 2104 2206, evitando perforar en la zona de resistividad baja menor de 10 Ω -m (Ver Tabla 3 para resistividades).

Resistividad estratificada entre -280 msnm y -300 msnm (Figuras 27 y 28).

Se observa que desde -280 a -300 msnm se encuentran altas resistividades entre 110 y mayores de 500 Ω -m. Se puede observar que en el área de estudio sigue predominando las resistividades entre 10 y 30 Ω -m, en menor cantidad se presenta resistividades de 30 a 70 Ω -m. Este estrato es favorable para la explotación agrícola en los Blocks 2104 y 2206, evadiendo la zona de resistividades altas (mayores de 110 Ω -m), y la zona de resistividades bajas (menor de 10 Ω -m). También se observa en el extremo sur del área en estudio la presencia de materiales impermeables de alta resistividad que impide el flujo subterráneo entre el mar y el acuífero.

5 CONCLUSION

Con la información obtenida puede concluirse que posiblemente en el Block 2206, en la porción centro-norte 2 estratos favorables se localizan entre -50 y -100 y en la porción centro sur entre 160 y 300 msnm el agua puede ser dulce. Entre -50 y -100 msnm, posiblemente agua de salobre a dulce. El estrato entre -100 y -160 msnm posiblemente agua salobre y finalmente otro estrato presenta posiblemente agua dulce entre -160 y -300 msnm.

Un material de alta resistividad aparece entre -280 y -300 msnm, podría ser parte del basamento del acuífero y el cual si se extiende puede funcionar como dique subterráneo, impidiendo la intercomunicación con el agua subterránea que proviene del mar, evitando el fenómeno de intrusión salina.

En el limite de la porción este del Block 2104 el estrato que se localiza entre -80 a -160 msnm (82 a 182 m de profundidad), contiene agua dulce a salobre, el cual no se recomienda explotar, ya que puede provocar transferencia de agua salobre periférica. La salinidad del agua se reduce entre -180 y -300 msnm y se extiende hacia el este-noroeste, resultando este el mejor estrato para explotar.

6 RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un muestreo para análisis químico del agua del pozo P130 y RZ2206-20 en cuanto a parámetros de evaluación de la calidad del agua para riego agrícola. Esto permitirá precisar su riesgo para este uso particular. Además debe entenderse que esta exploración solo permite orientar y planear con mayor seguridad la posible perforación de pozos, por lo que si se toma esta opción, se requerirá llevar un control del material estratigráfico que se extrae durante la perforación a cada 2 m, así como la resistividad de lodo de perforación a su entrada y salida y de la obtención

de un registro eléctrico de pozos una vez concluida la perforación. Con todo esto se podrá tener un buen diseño de pozos, previo al ademado de los mismos.

Debe tomarse en cuenta el balance del agua subterránea en estas zonas costeras, ya que puede existir comunicación con el mar mediante materiales permeables y una extracción que invierta el gradiente hidráulico en la franja costera puede generar el fenómeno de intrusión salina, el cual es perjudicial para los acuíferos.

7 BIBLIOGRAFIA

- Canales E.A.G, A. Camarena L, 1999. Hidrología Subterránea. Prospección Geofísica. Instituto Tecnológico de Sonora.
- Custodio Emilio. Llamas Ramón M.1769. Hidrología Subterránea. Ed. Omega. Barcelona. 1143 p.
- De la Peña I.1997.Disponibilidad hidráulica superficial y subterránea de la cuenca hidrológica del Río Yaqui, Sonora, Subgerencia de riego y Drenaje. Ciudad Obregón, Sonora, México. p.47.
- Encinas A. 2000.Determinación de la permeabilidad vertical del acuífero del Valle del Yaqui, utilizando información litológica de pozos, tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Instituto tecnológico de Sonora, ciudad Obregón, Sonora, México. P.84.
- González Enríquez R. Marin Stillman (2000) HYDROGEOLOGIC CONCEPTUAL MODEL OF AQUIFER OF THE YAQUI VALLEY, SONORA, IN A REGIONAL GEOLOGIC CONTEXT.1992.. Revista ITSON-DIEP, Vol. II Num 8, Pág. 69-84.
- González Enríquez R., Canales Elorduy., Marin Stillman (1998), HIDROGEOCHEMISTRY AND MINERALOGY OF THE YAQUI VALLEY AQUIFER. Revista ITSON-DIEP, Vol. II Num. 7, Pág. 55-64.
- H. Griffiths, R.F.King, (1999) GEOFISICA APLICADA PARA INGENIEROS Y GEÓLOGOS. D. paraninfo, MADRID.
- Jonson División, UOP Inc. (1975).EL AGUA SUBTERRANEA Y LOS POZOS. Primera edición. publicado por:. Saint Paul, Minnesota 55165
- MATULA, M., ed., 1979,engineering-geological Studies of Rock Environment and Geodynamic Processes, veda,Bratislava p.335.
- Méndez Arocha M. Citado por Canales E.A.G. Hidrología Subterránea. Prospección Geofísica. Instituto Tecnológico de Sonora.
- Mijailov, L. 1989.Hidrogeología.Ed.Mir. Moscu. 286 p.

MULLER Y SALZBURG,1967, Gesteins-und gebirgseigenschaften in Abha engigkeit vom betrachteten grossenbereich, Z.geol. Gesellschaft, 119, 65 (Version in english).

Ray K. Linsley, (1977) HIDROLOGIA PARA INGENIEROS. Stanford University.

William E Kelly, Stanislav Mares(1993) DEVELOPMENTS IN WATER SCIENCE, APPLIED GEOPHYSICS IN HYDROGEOLOGICAL AND ENGINEERING PRACTICE. Elsevier editors.

Estudio para el aprovechamiento de los acuíferos salinos del valle del río Yaqui, son. Contrato No. GZA-79-35-GD TEXTO INGENIEROS CIVILES Y GEOLOGOS ASOCIADOS, S.A. CONSULTORES MEXICO D.F. diciembre 1979.

Inman, J.R., 1975, Resistivity inversion with ridge regression: Geophysics, 40 pp 798-817. citado por el Tutorial del Software IXRes 1.00.

DeGroot-Hedlin, C. and Constable, S., 1990, Occam's inversion to generate smooth two-dimensional models from magnetotelluric data: Geophysics 55, 1613-1624. citado por el Tutorial del Software IXRes 1.00.

8 ANEXOS

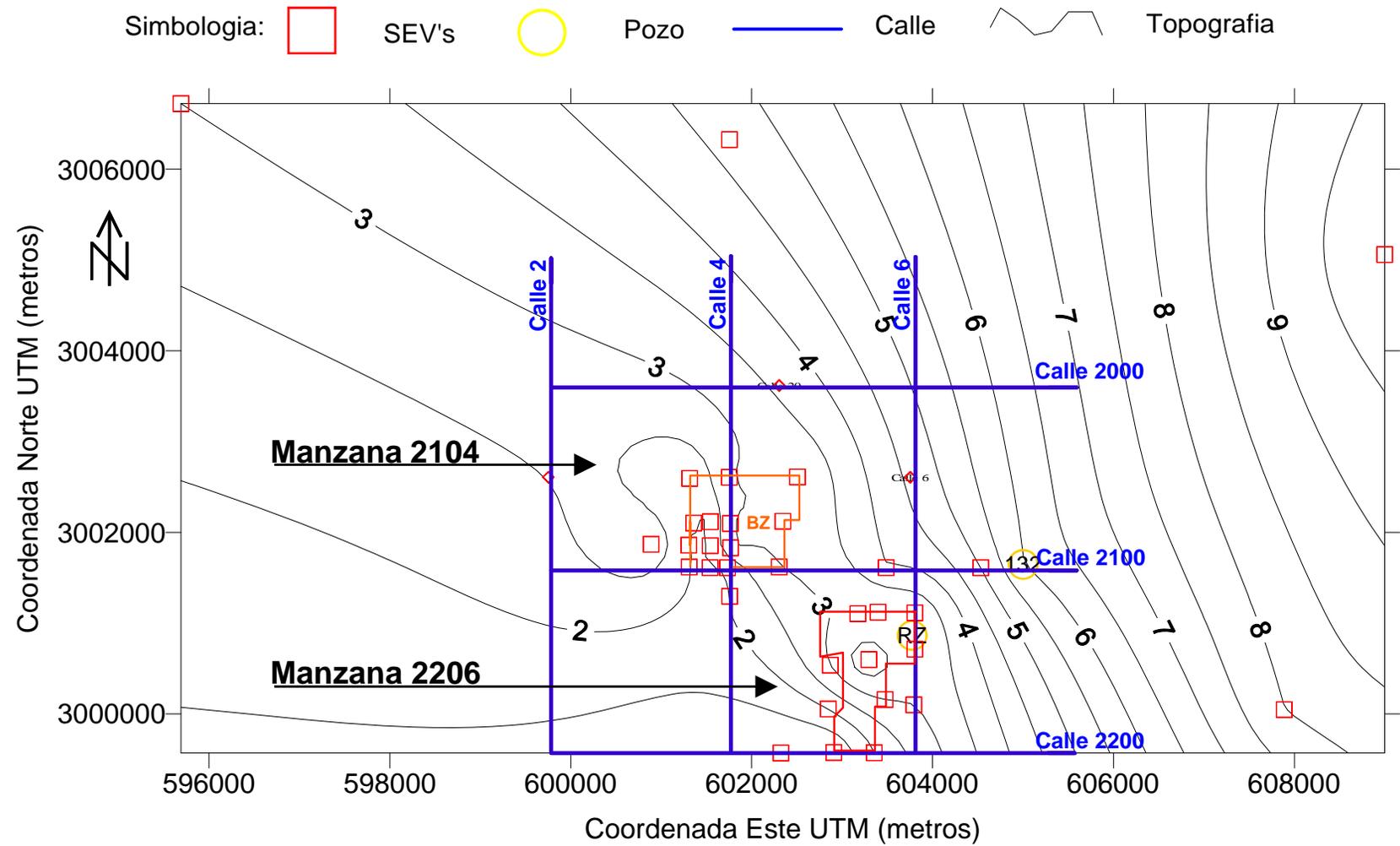


Fig. 6. Mapa Topográfico y Localización de los Sev's en la zona de estudio.

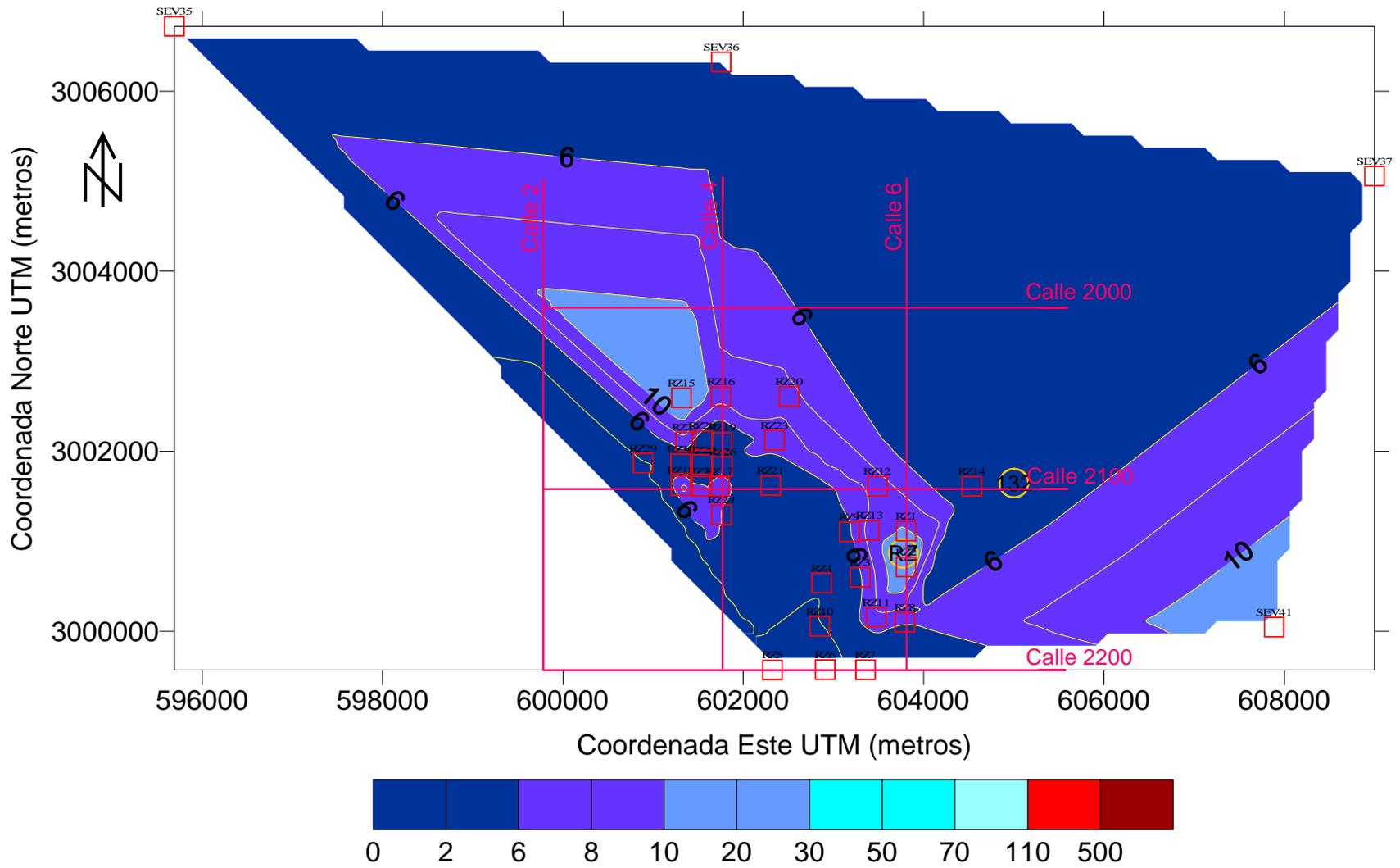


Fig. 7. Resistividad a 0msnm en la zona de estudio.

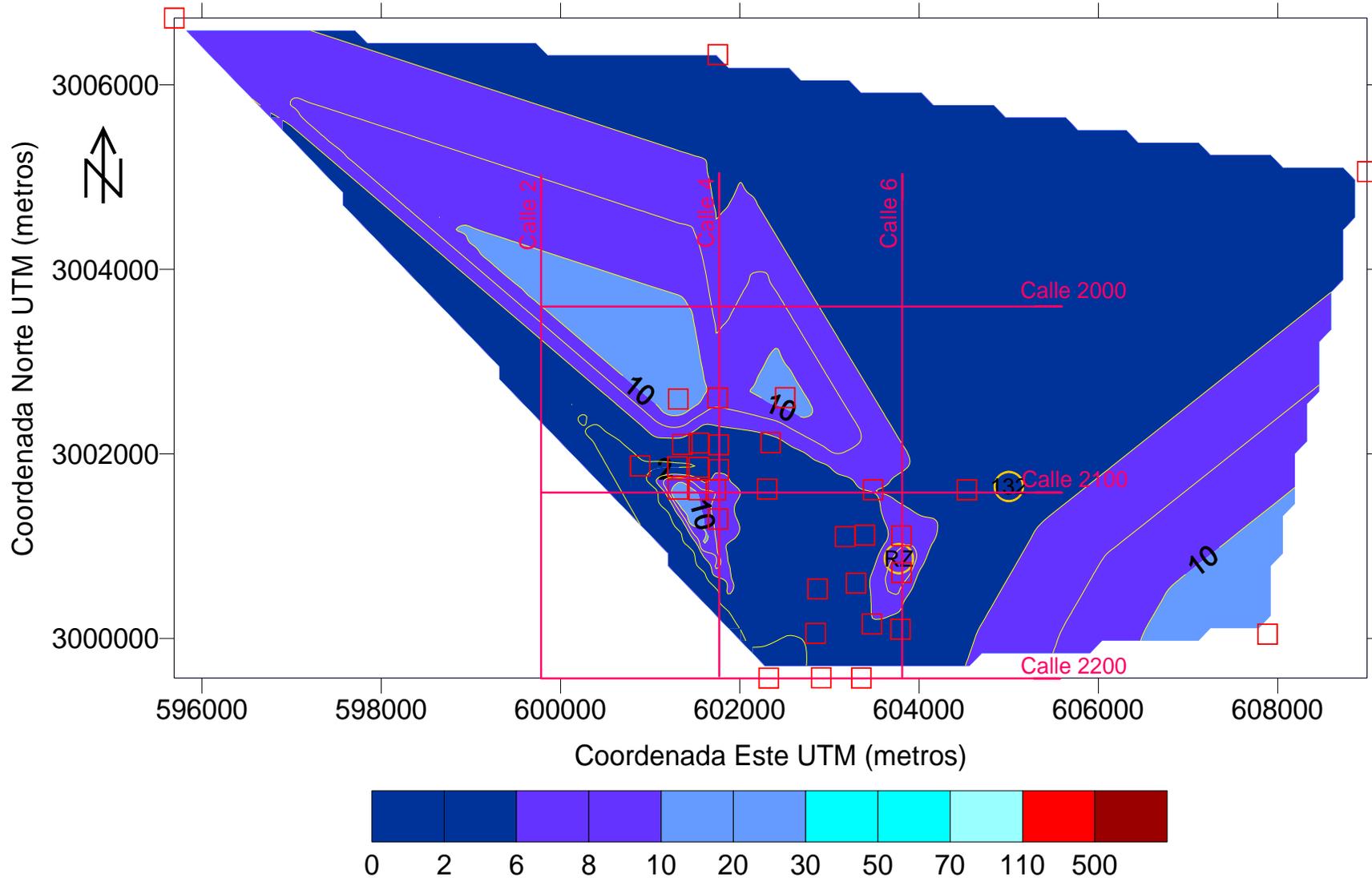


Fig. 8. Resistividad a -5msnm en la zona de estudio.

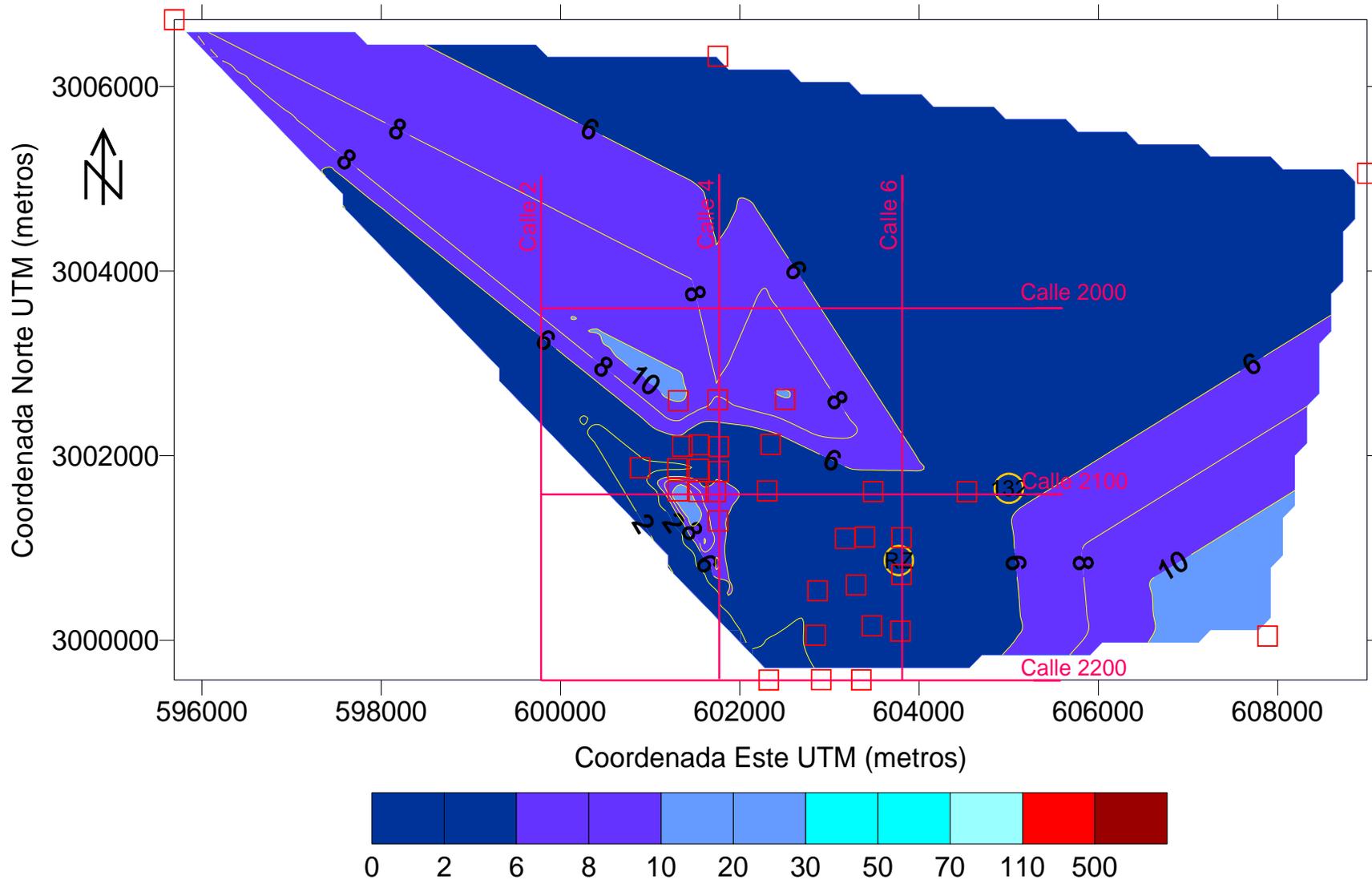


Fig. 9. Resistividad a -10msnm en la zona de estudio.

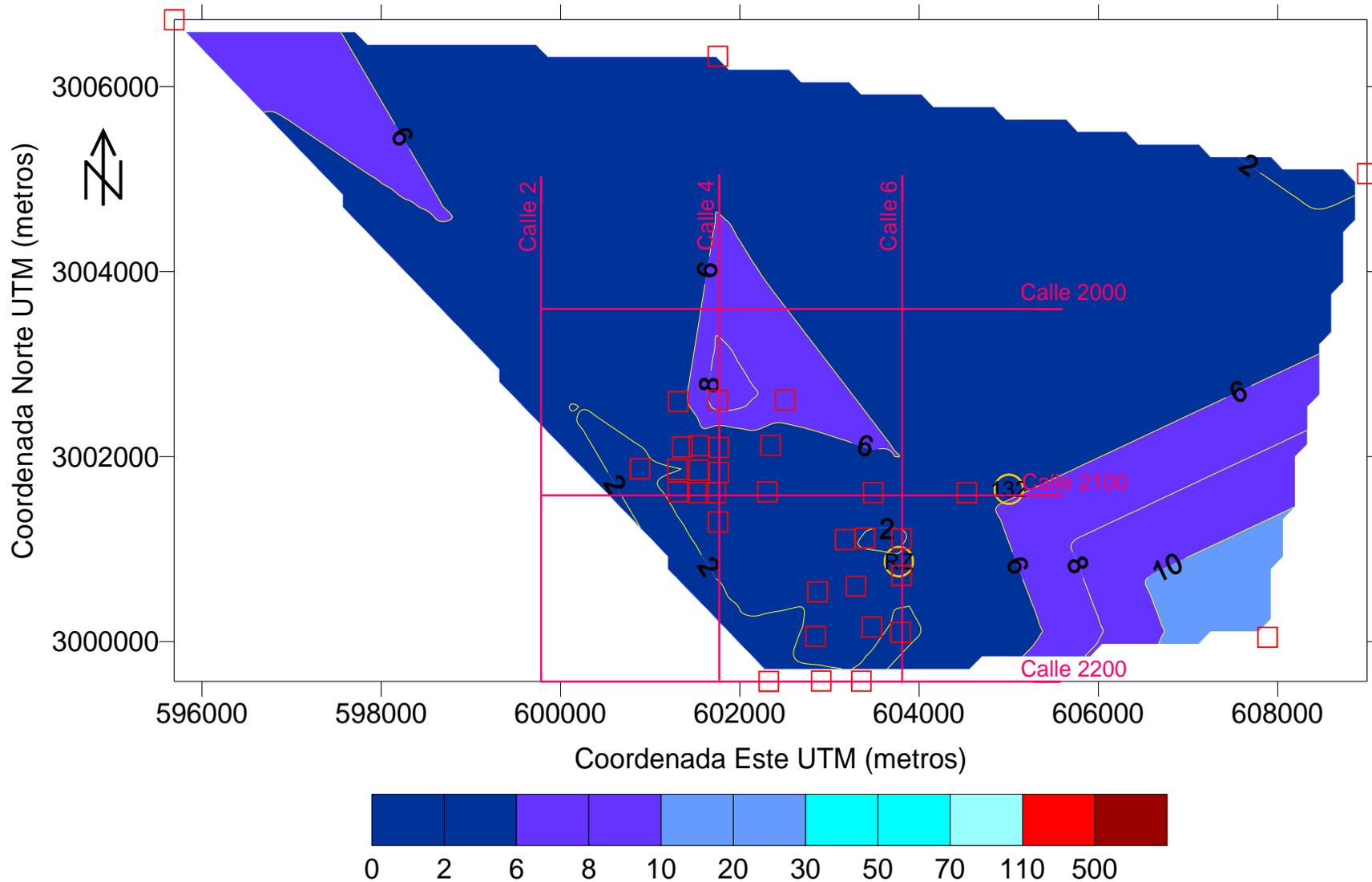


Fig. 10. Resistividad a -20msnm en la zona de estudio.

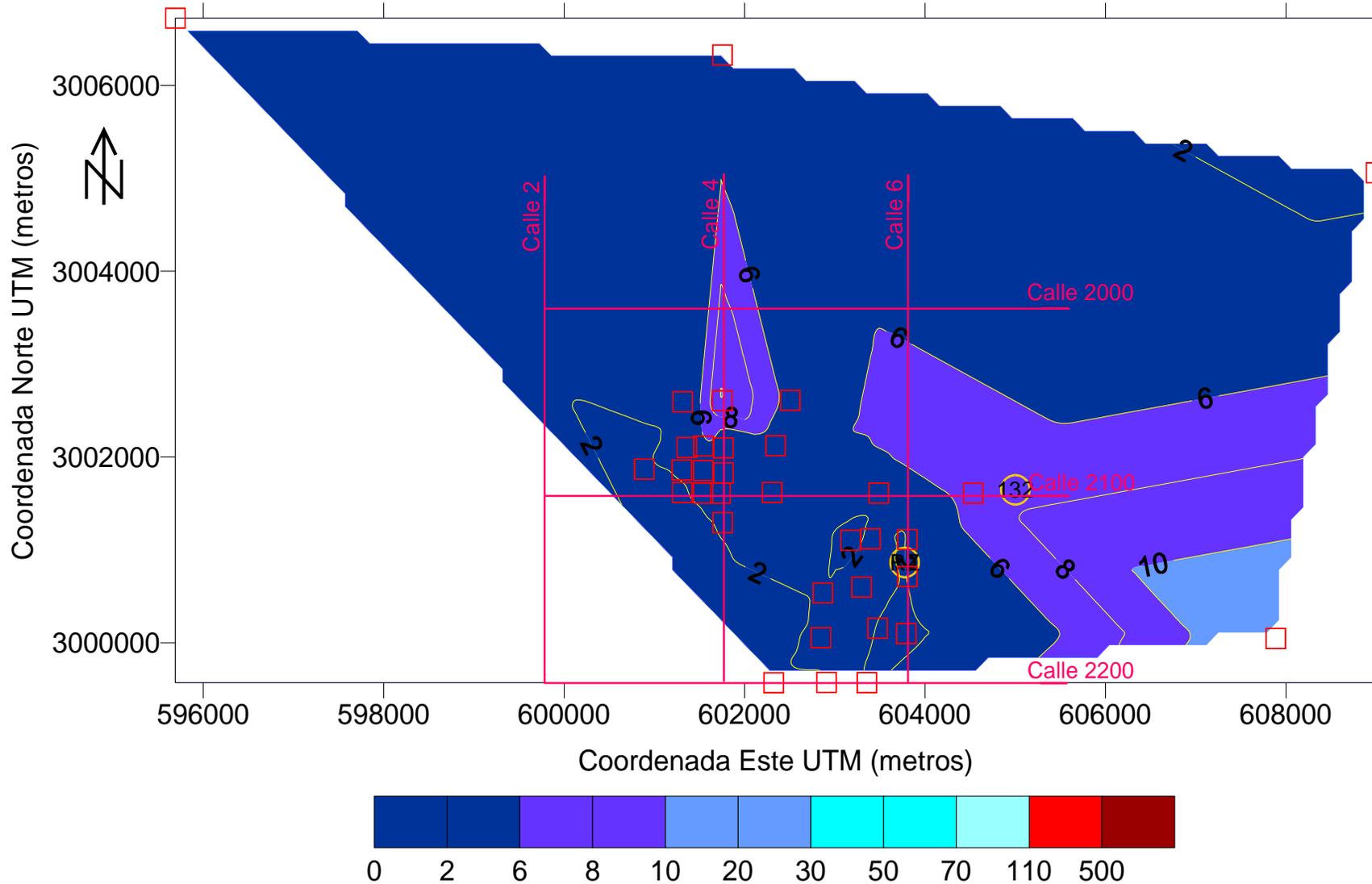


Fig. 11. Resistividad a -30msnm en la zona de estudio.

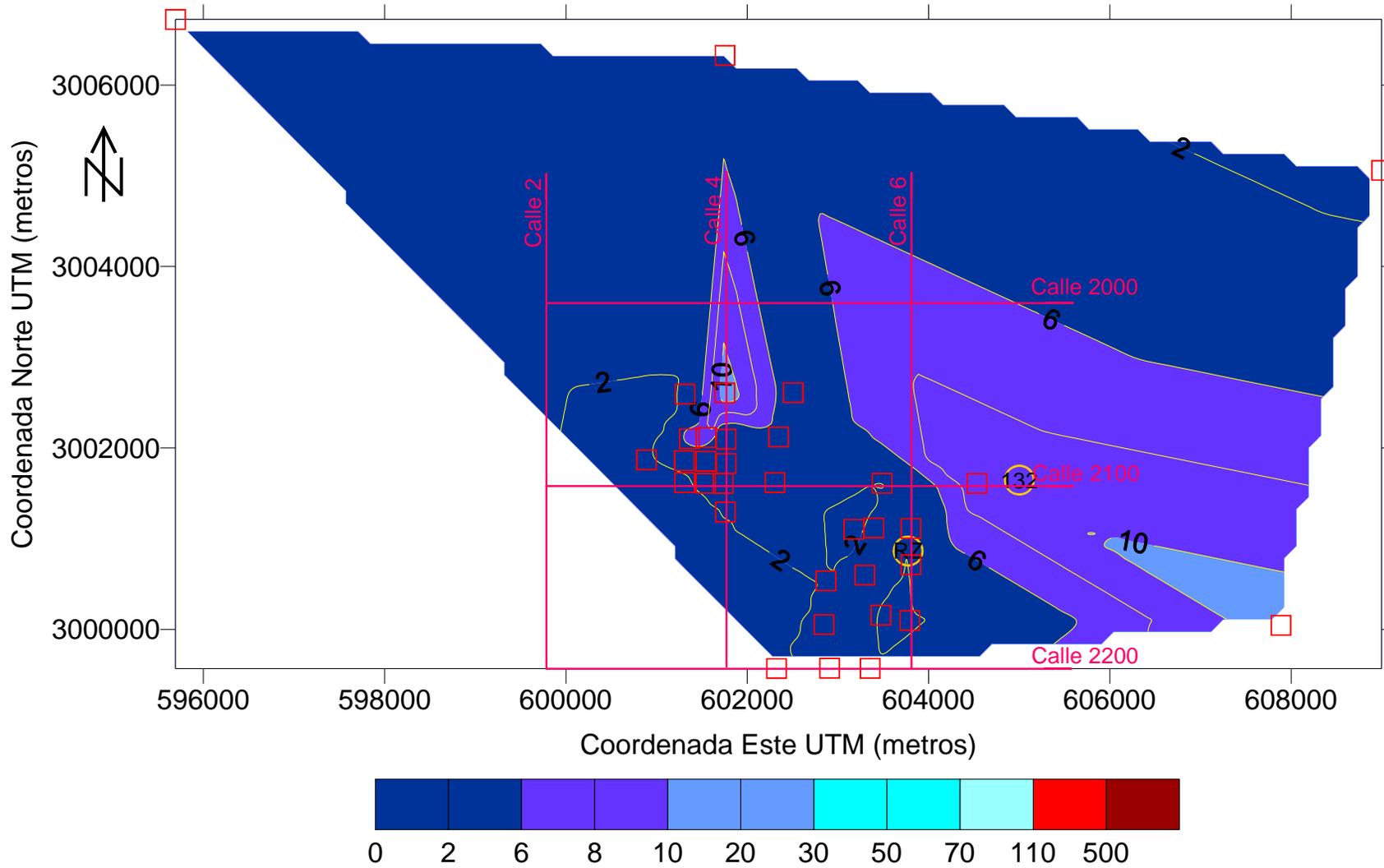


Fig. 12. Resistividad a -40msnm en la zona de estudio.

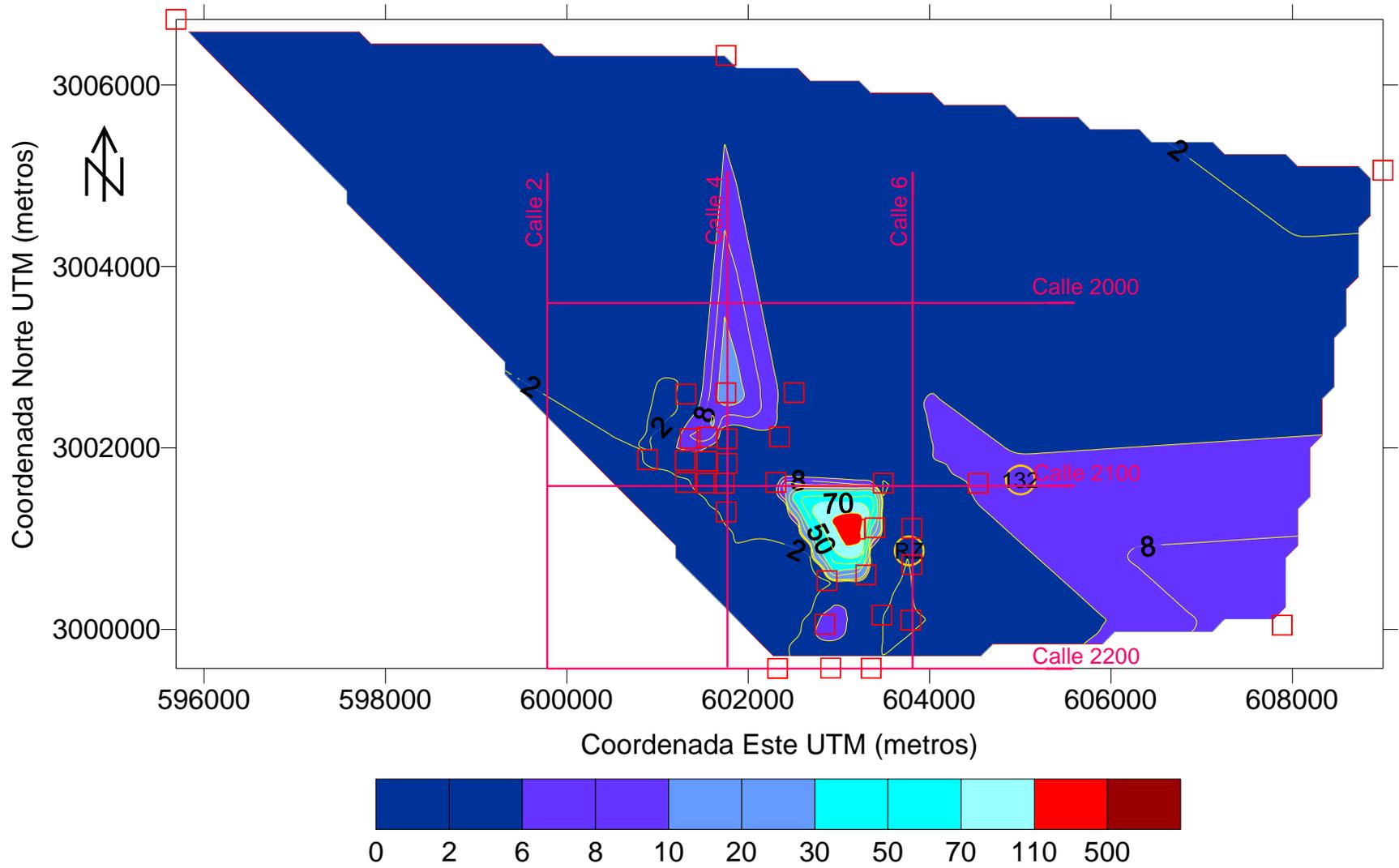


Fig. 13. Resistividad a -50msnm en la zona de estudio.

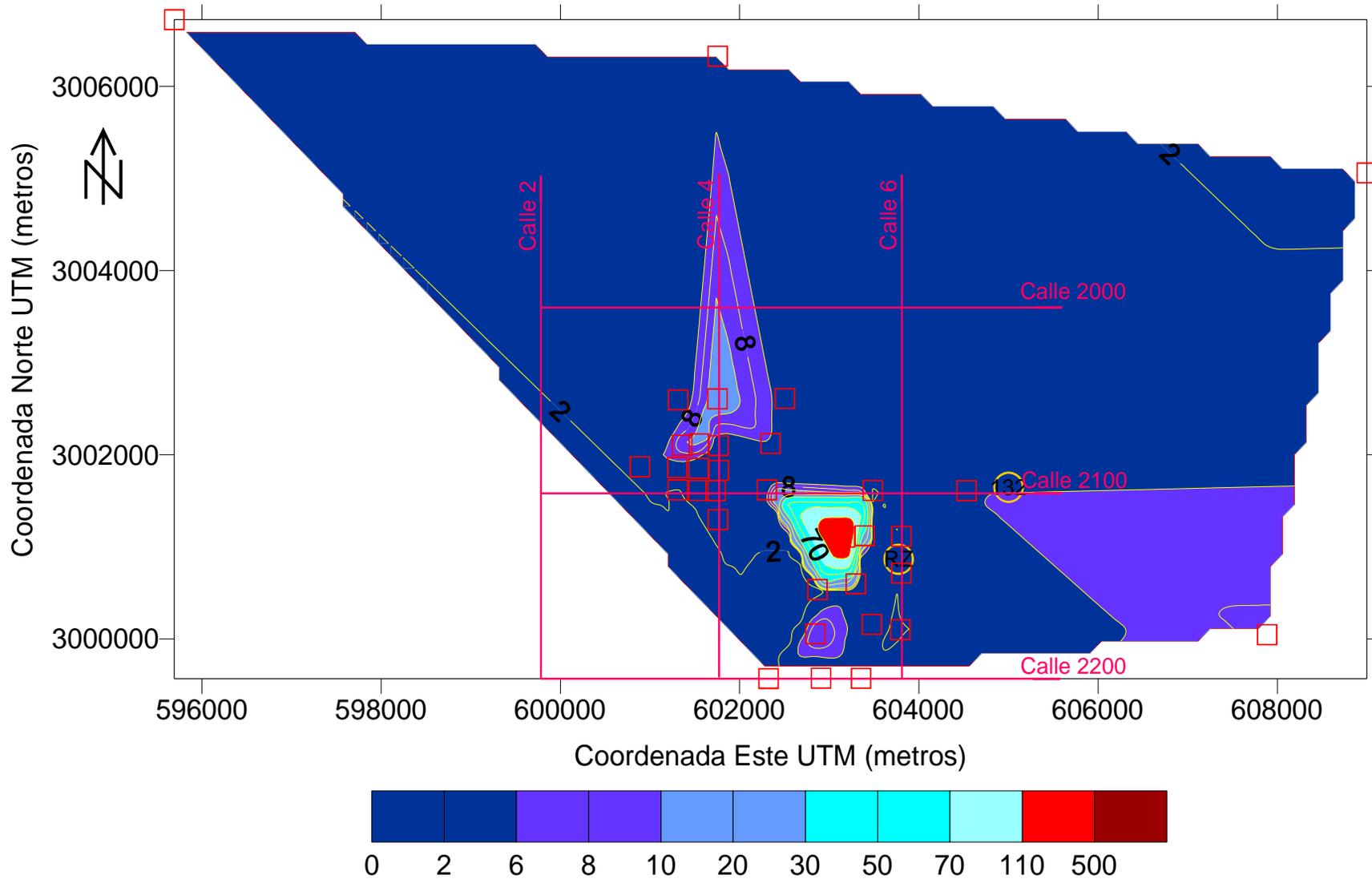


Fig. 14. Resistividad a -60msnm en la zona de estudio.

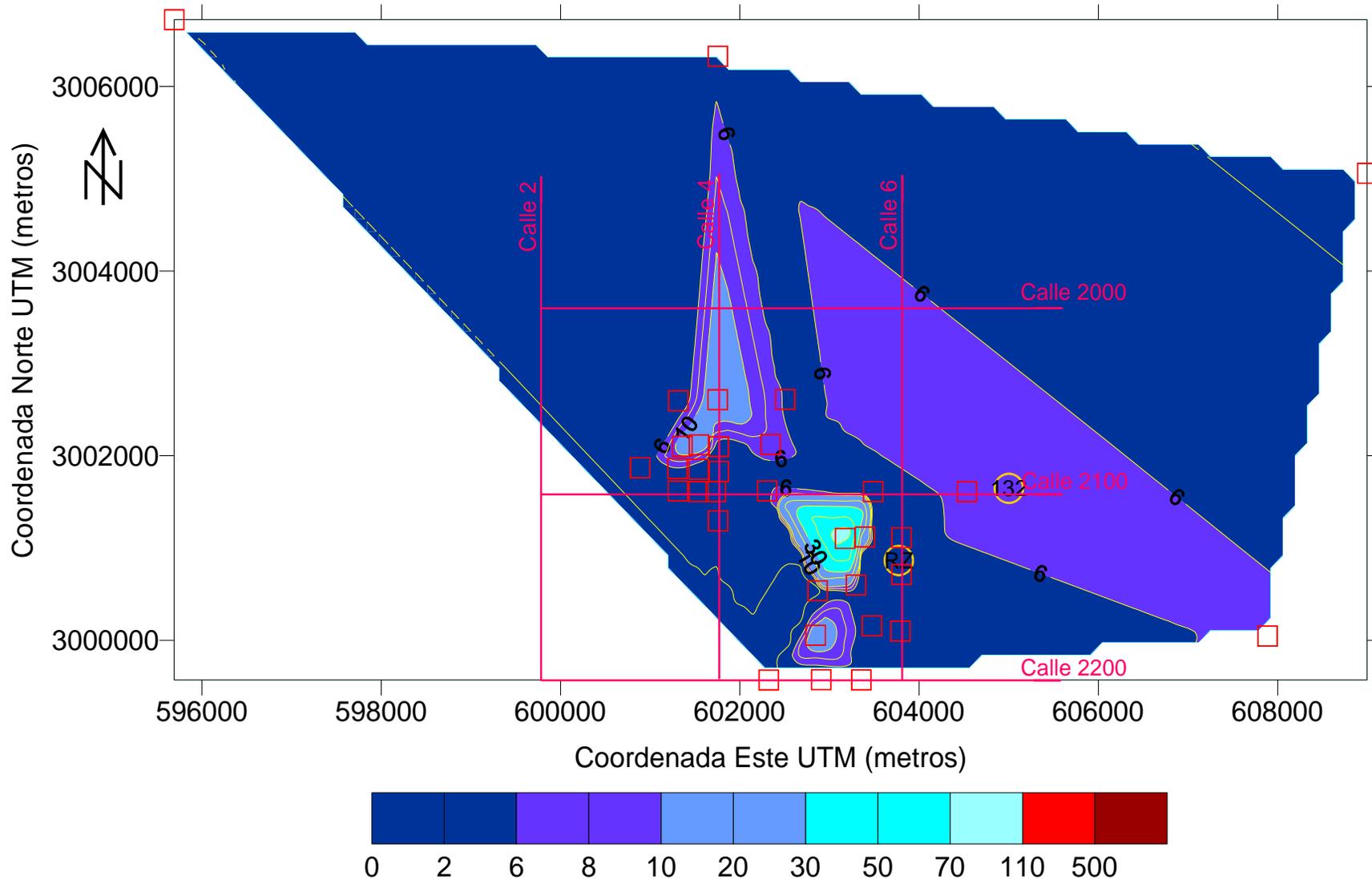


Fig. 16. Resistividad a -80msnm en la zona de estudio.

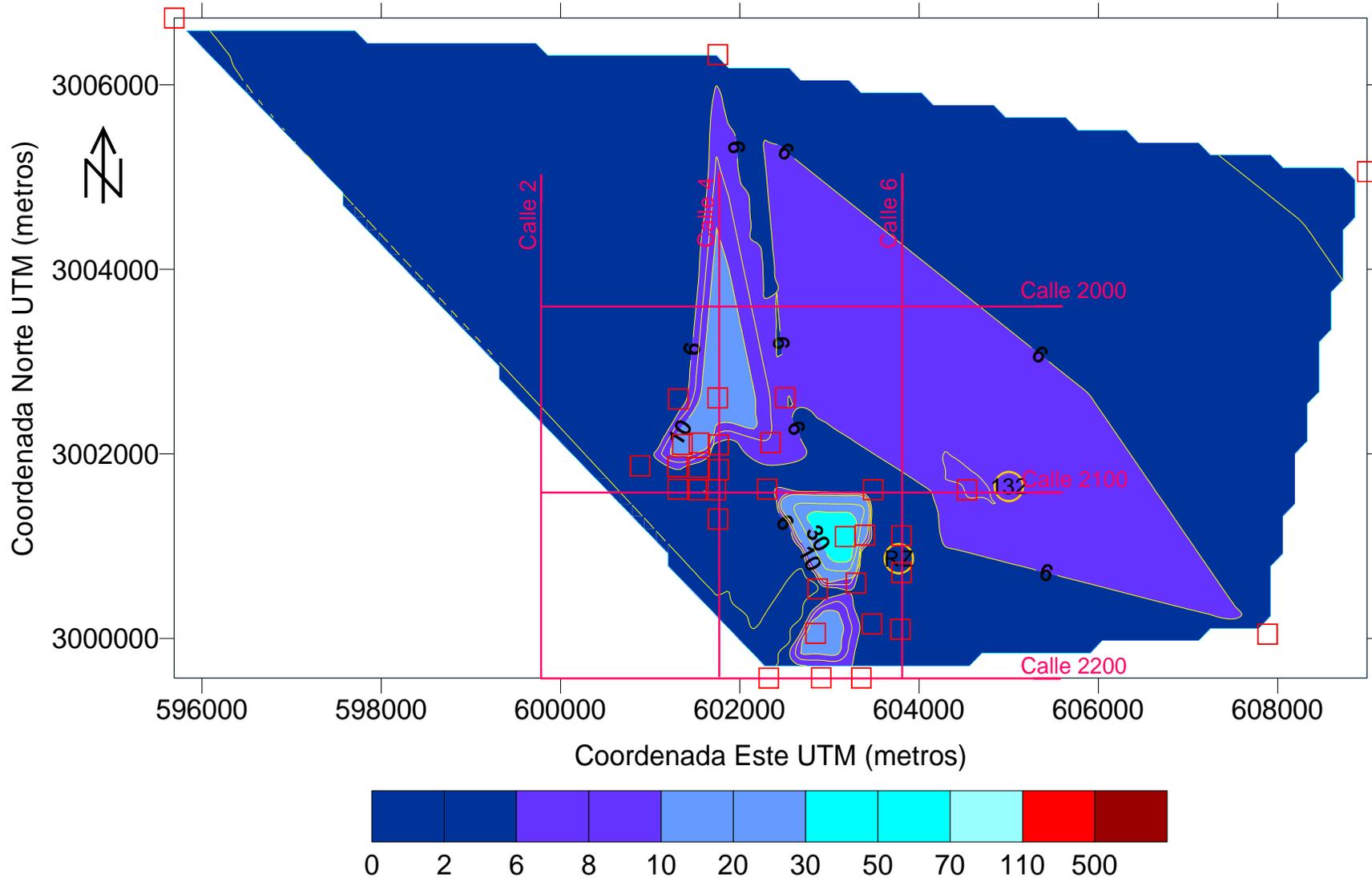


Fig. 17. Resistividad a -90msnm en la zona de estudio.

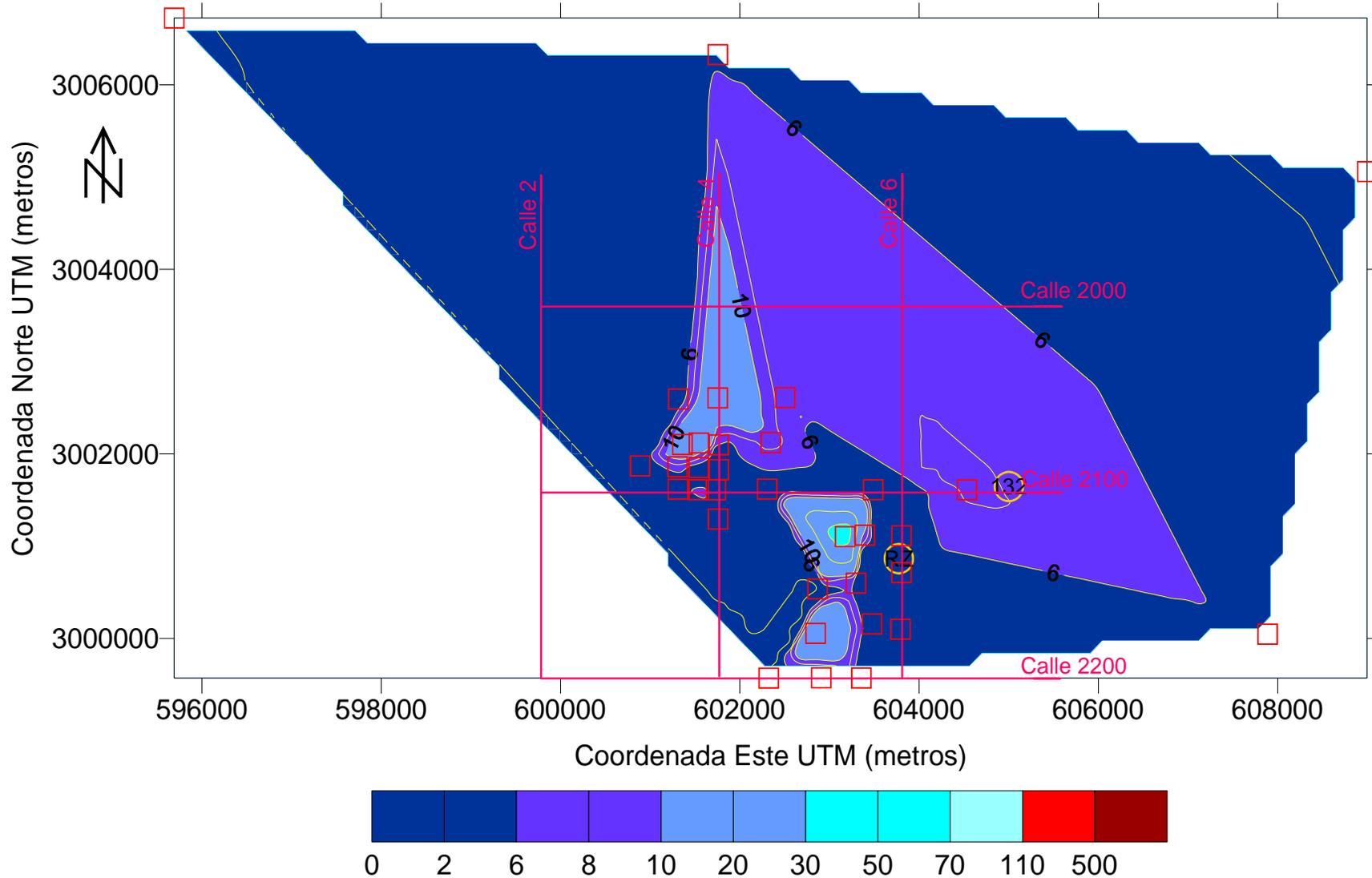


Fig. 18. Resistividad a -100msnm en la zona de estudio.

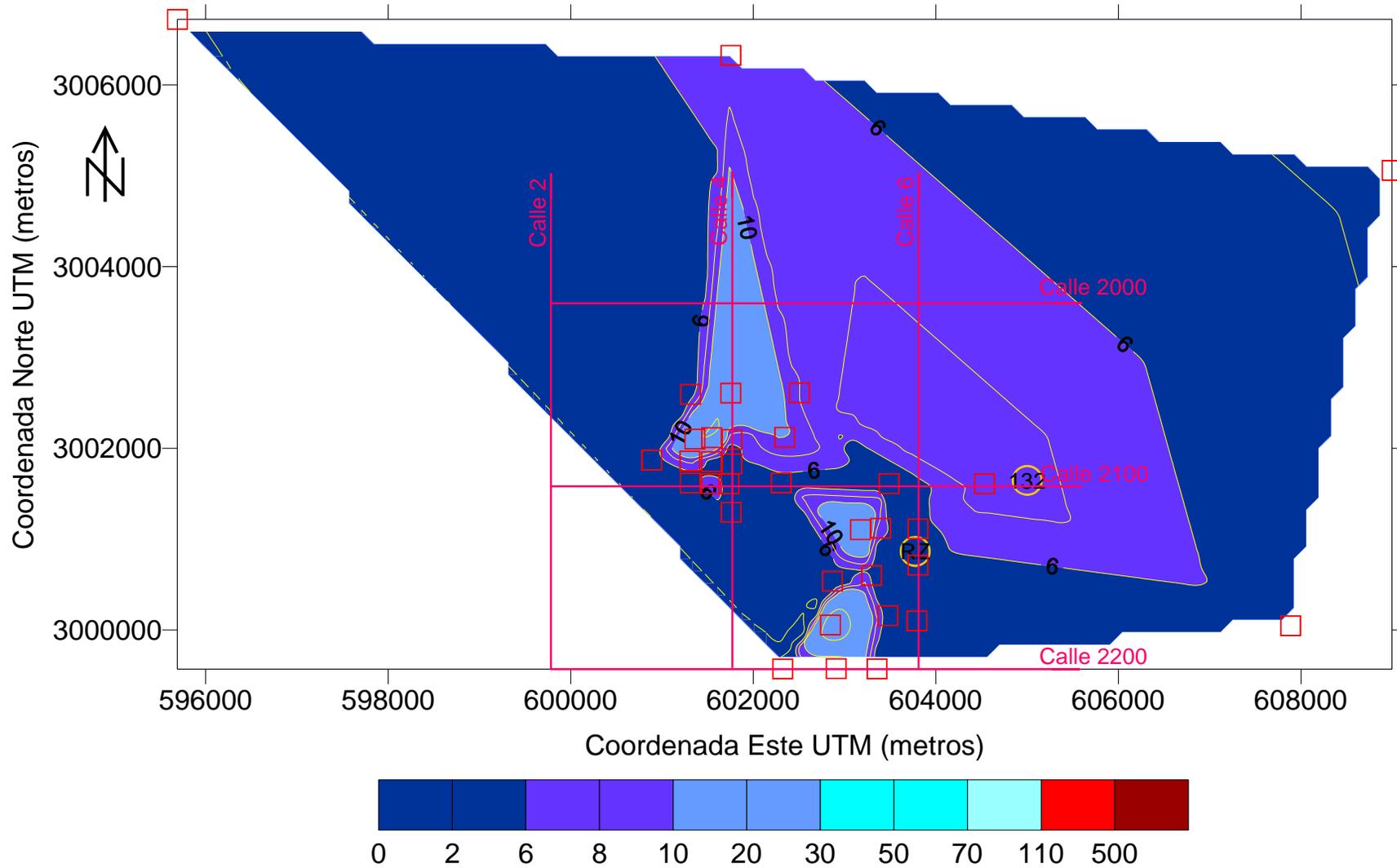


Fig. 19. Resistividad a -120msnm en la zona de estudio.

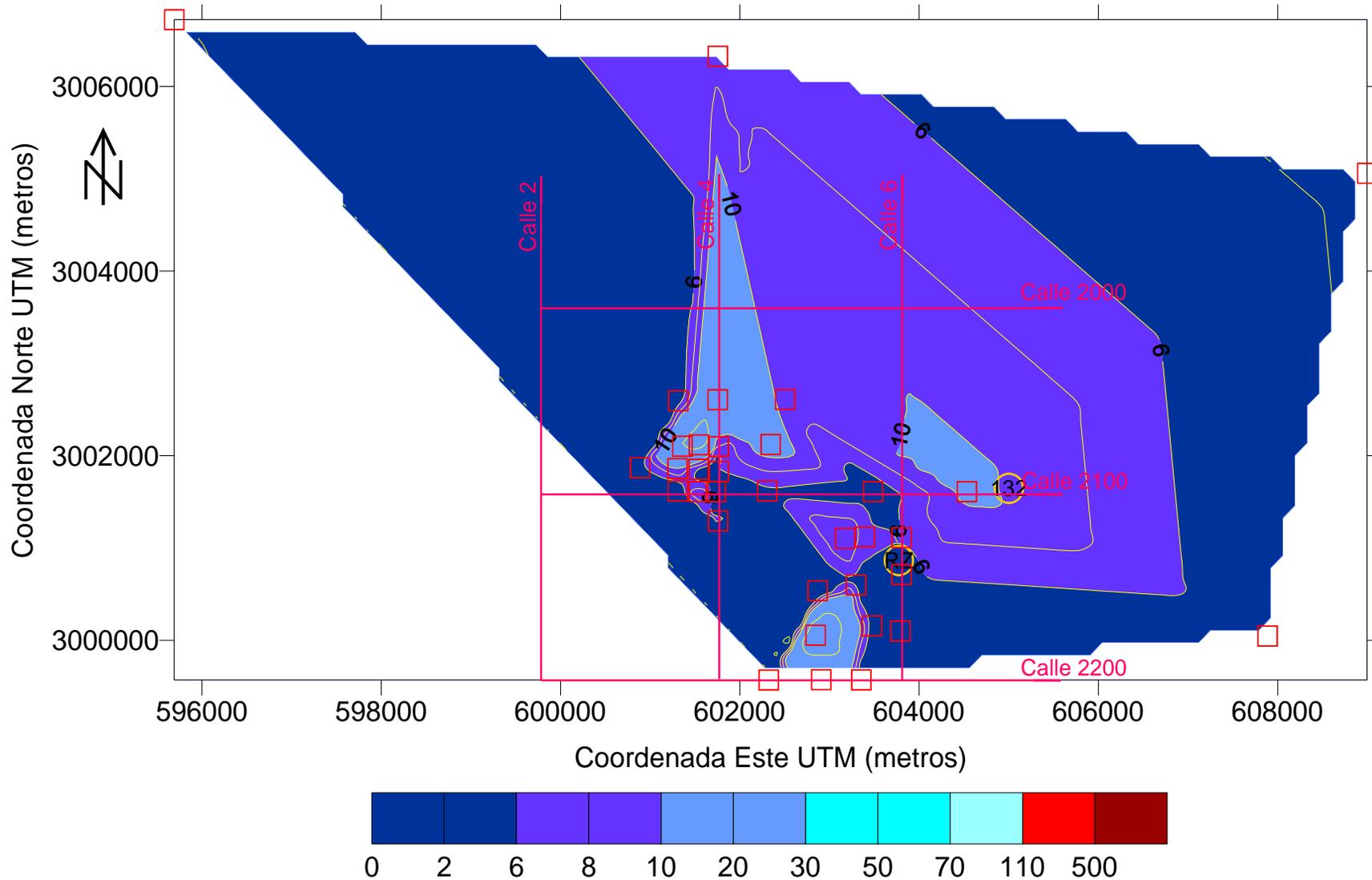


Fig. 20. Resistividad a -140msnm en la zona de estudio.

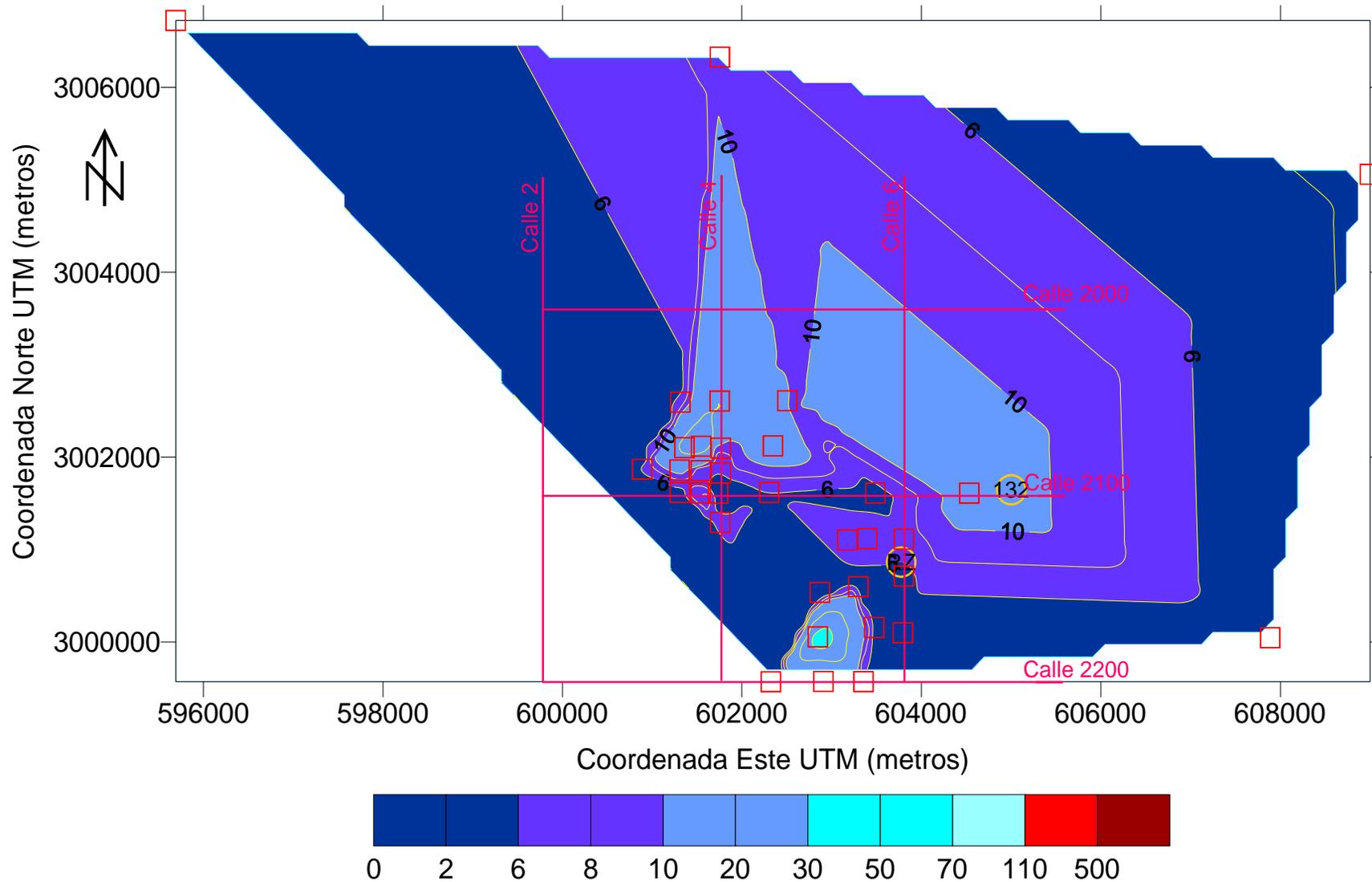


Fig. 21. Resistividad a -160msnm en la zona de estudio.

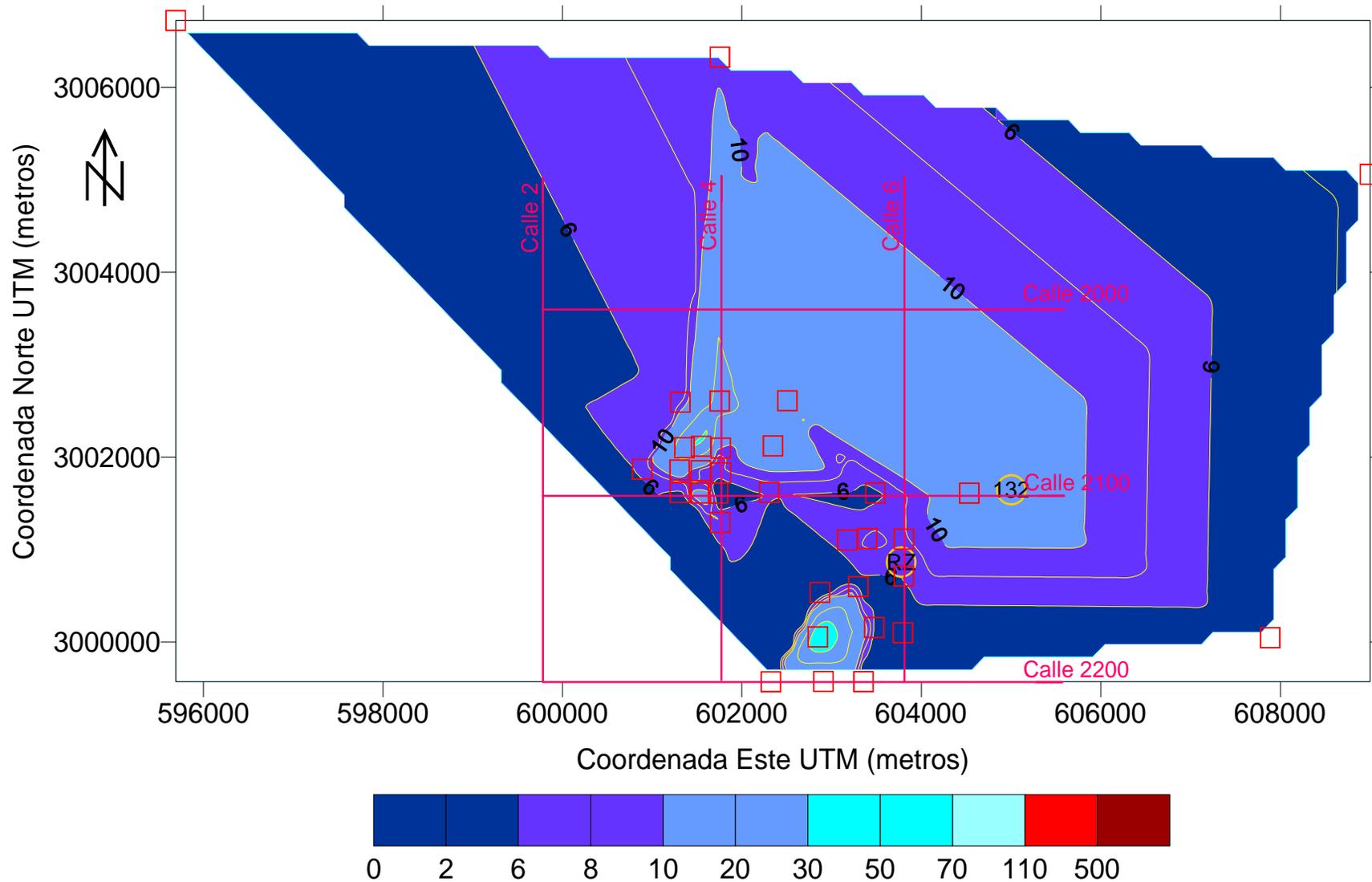


Fig. 22. Resistividad a -180msnm en la zona de estudio.

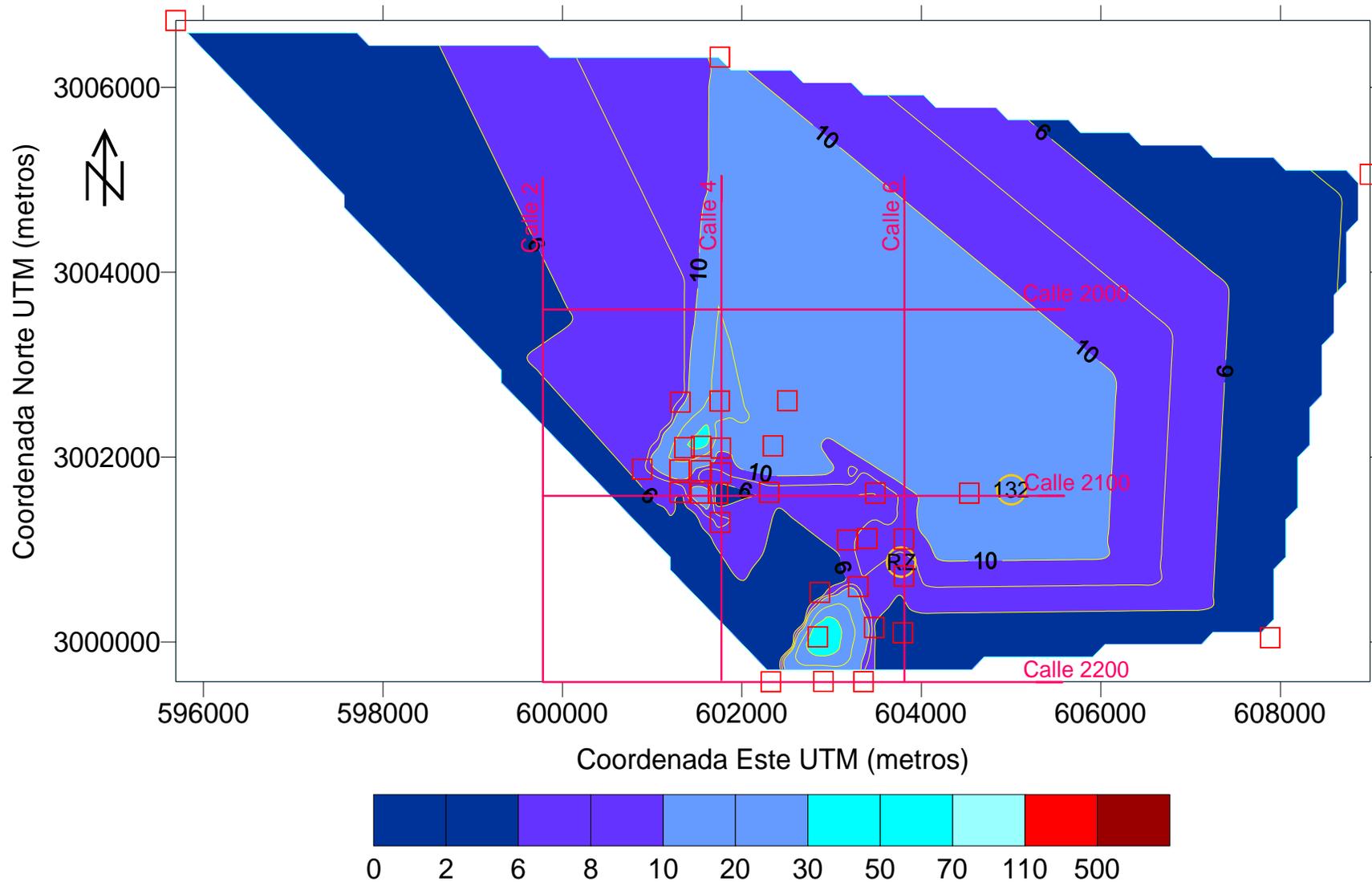


Fig. 23. Resistividad a -200msnm en la zona de estudio.

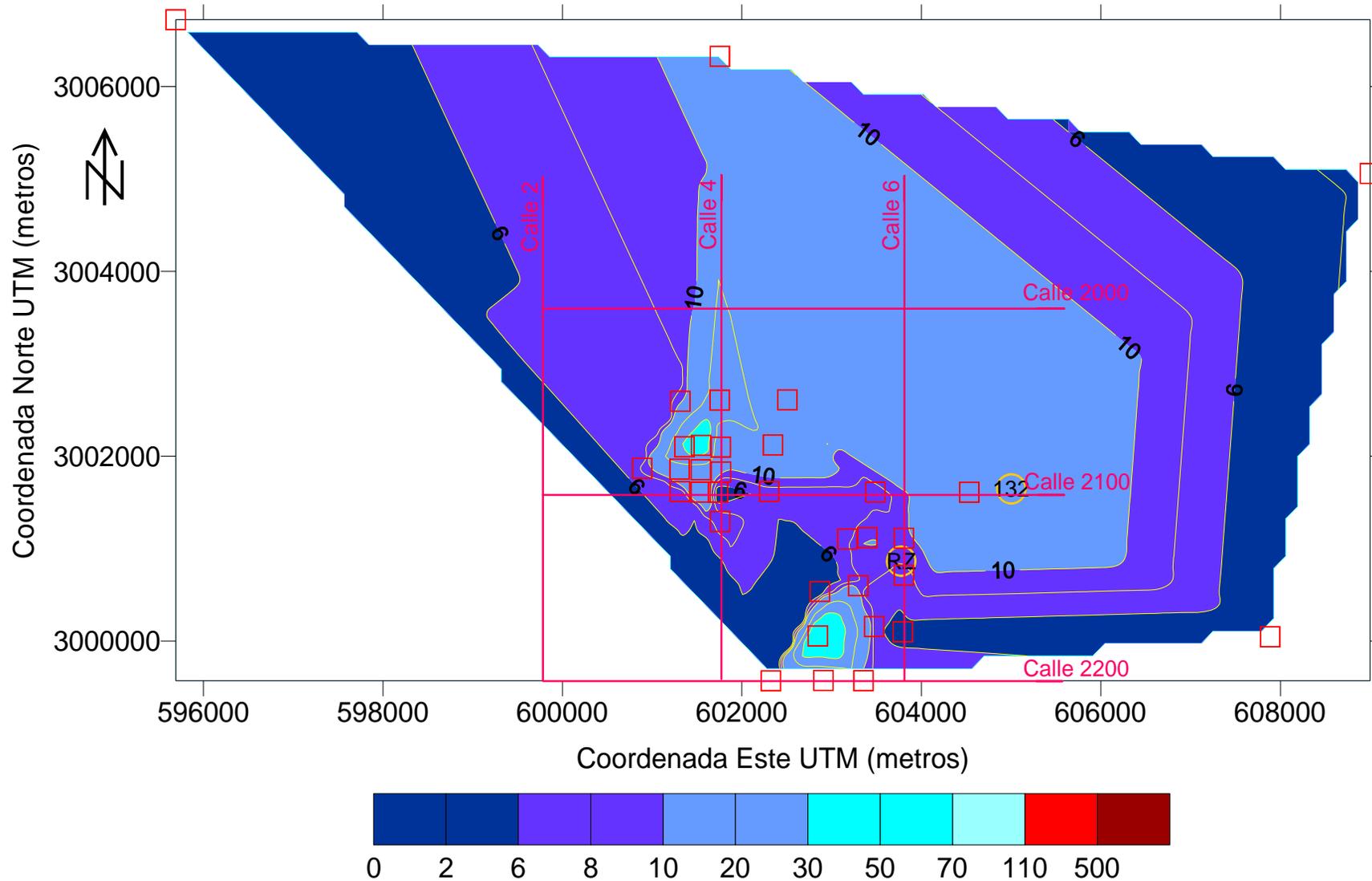


Fig. 24. Resistividad a -220msnm en la zona de estudio.

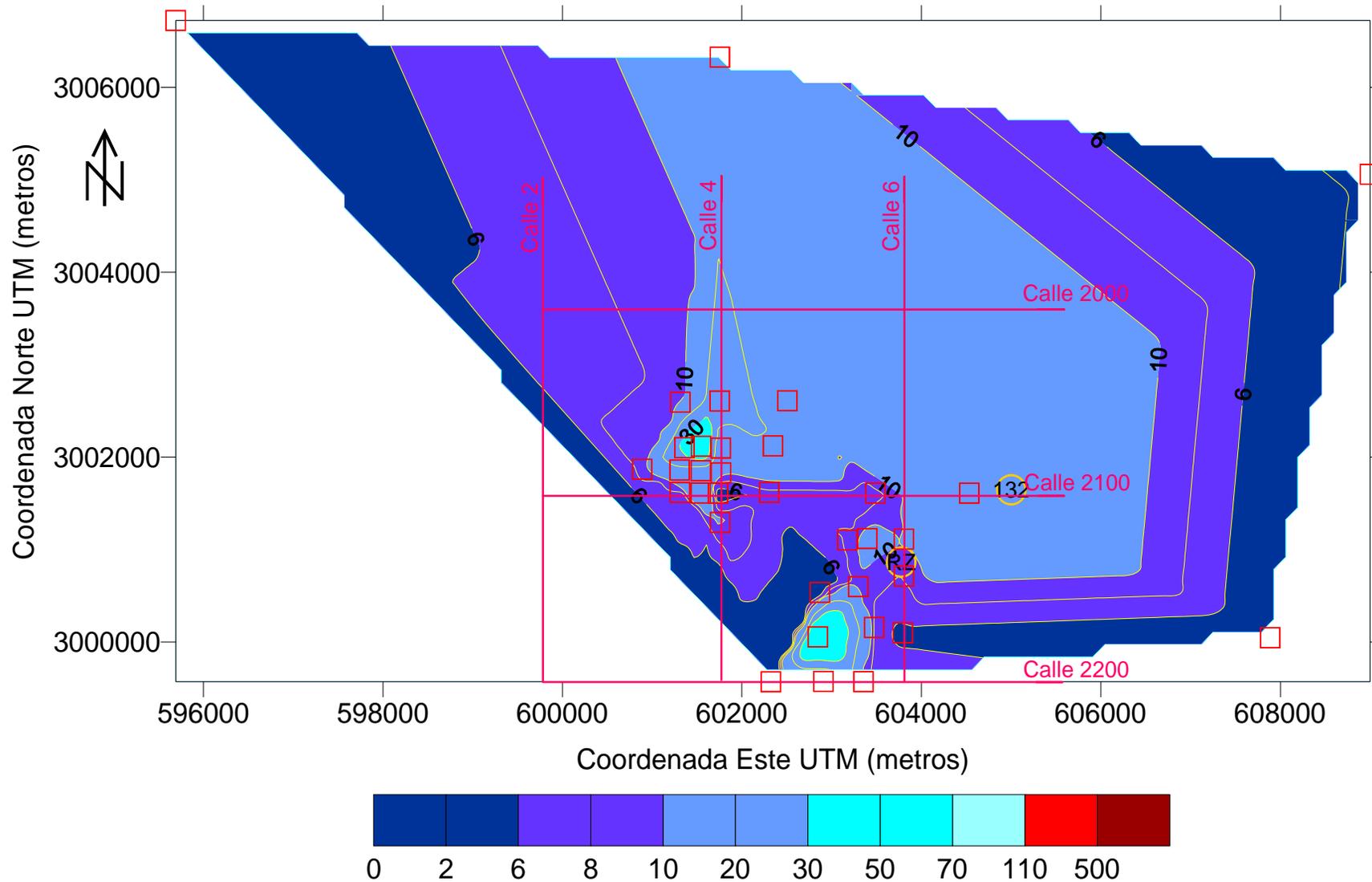


Fig. 25. Resistividad a -240msnm en la zona de estudio.

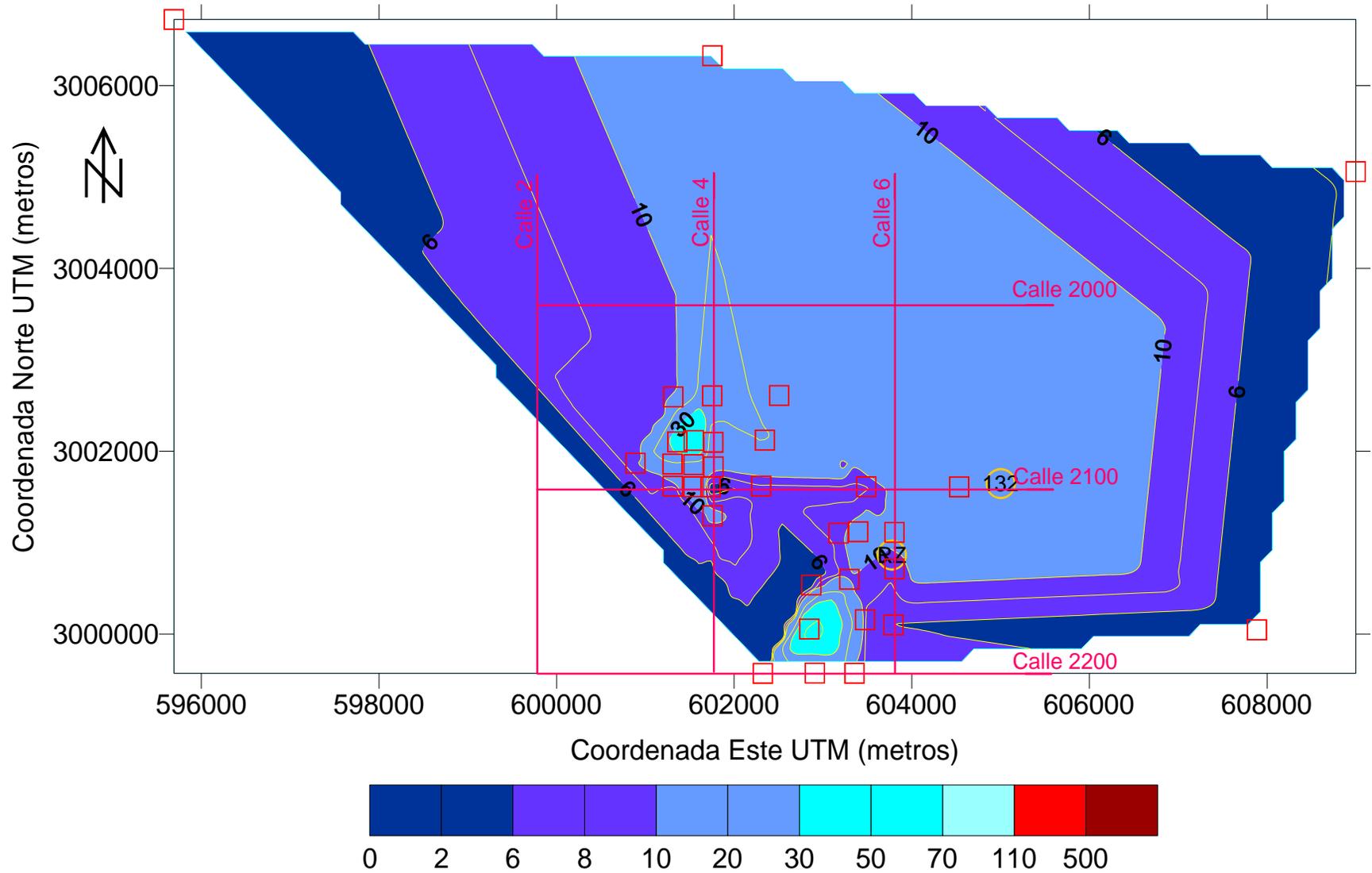


Fig. 26. Resistividad a -260msnm en la zona de estudio.

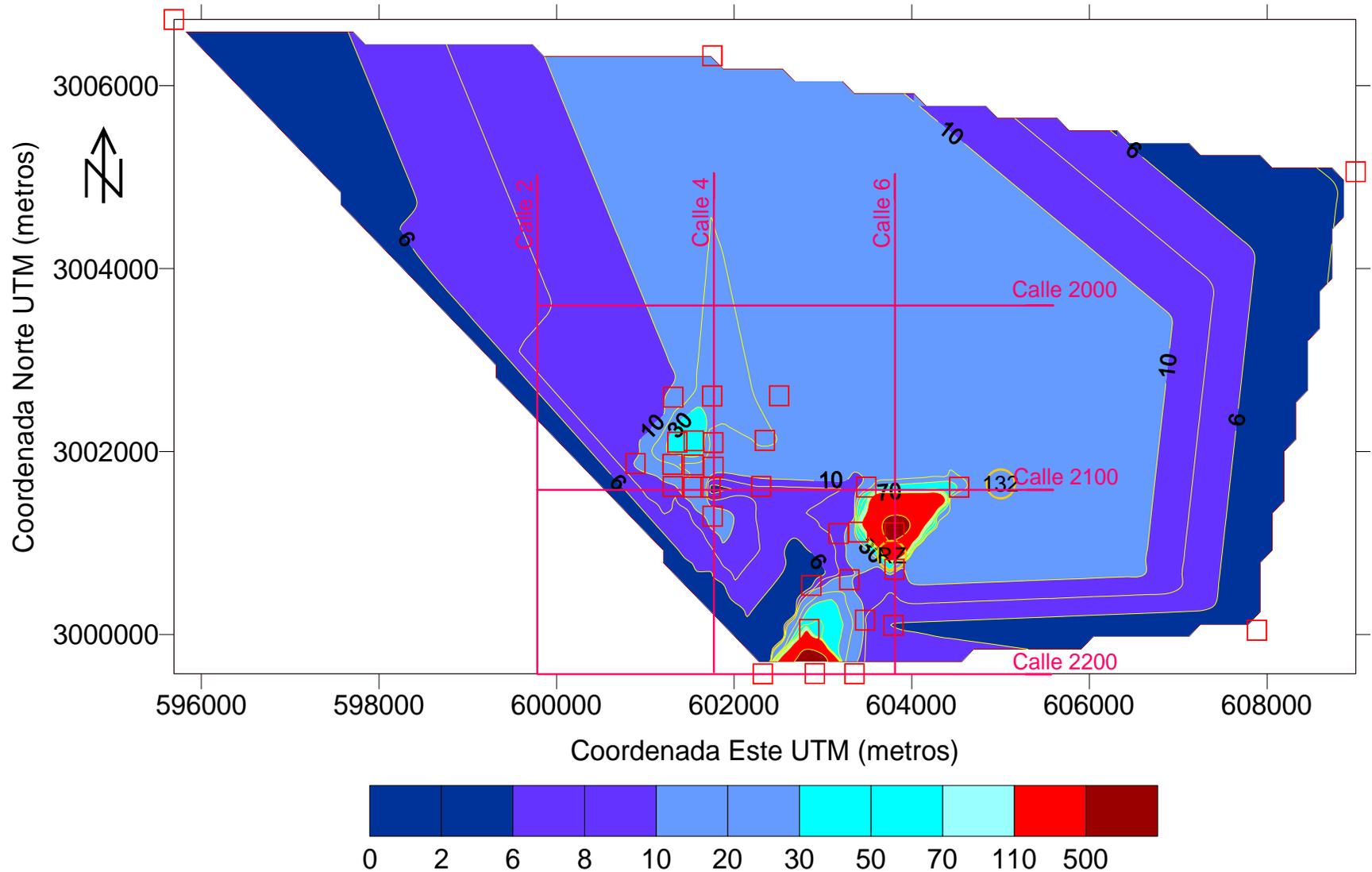


Fig. 27. Resistividad a -280msnm en la zona de estudio.

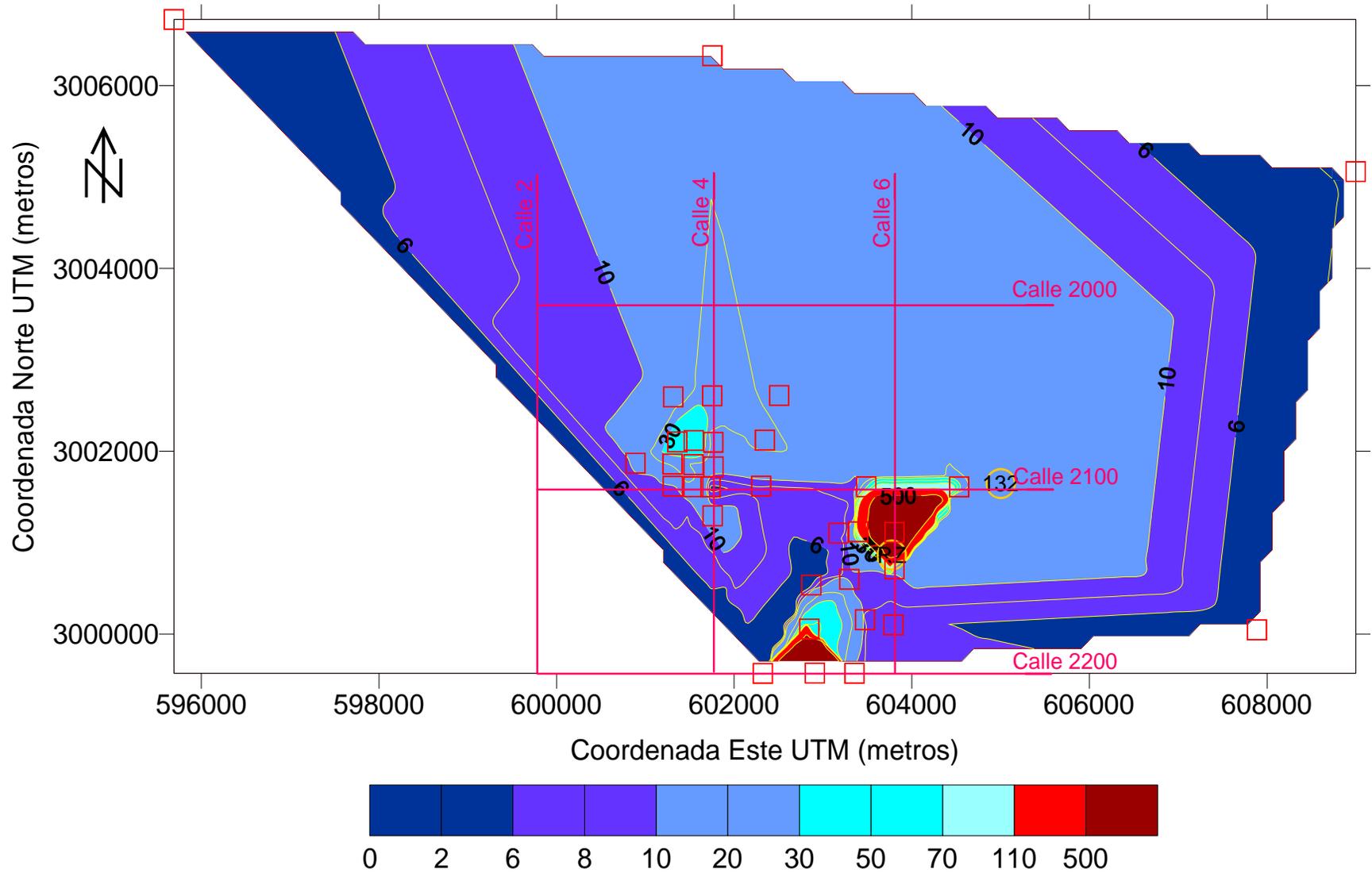


Fig. 28 Resistividad a -300msnm en la zona de estudio.