

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

PROSPECCIÓN GEOFÍSICA APLICANDO GPR EN LA IGLESIA SANTA ANA DEL NORTE, MUNICIPIO GÓMEZ, ESTADO NUEVA ESPARTA

Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela por el
Br. Romero P, Juanpablo L
para optar al título de Ingeniero Geofísico.

Caracas, noviembre de 2009

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

PROSPECCIÓN GEOFÍSICA APLICANDO GPR EN LA IGLESIA SANTA ANA DEL NORTE, MUNICIPIO GÓMEZ, ESTADO NUEVA ESPARTA

Tutor Académico: Prof. Nuris Orihuela

Cotutor: Antrop. Lilia Vierma

Tutor Industrial: Ing. Aldo Cataldi

Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela por el
Br. Romero P, Juanpablo L
para optar al título de Ingeniero Geofísico.

Caracas, noviembre de 2009

Caracas, diciembre de 2009

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería (especialidad), para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el (la o los) Bachiller (es), titulado:

**“PROSPECCIÓN GEOFÍSICA APLICANDO GPR EN LA IGLESIA SANTA ANA DEL NORTE,
MUNICIPIO GÓMEZ, ESTADO NUEVA ESPARTA”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero (especialidad), y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el (los) autor (es), lo declaran APROBADO.

Prof. Antonio Ughi
Jurado

Prof. Jesús González
Jurado

Prof. Nuris Orihuela
Tutor Académico

“Enfrentamos el futuro fortalecidos solo con las lecciones que hemos aprendido en el pasado. Es hoy que debemos crear el mundo del futuro... en un sentido muy real, el mañana es ahora.”

Eleanor Roosevelt

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela y su comunidad tanto en la Ciudad Universitaria de Caracas como en el núcleo de Cagua por todas las experiencias de vida.

Agradezco a mis tutores, Nuris Orihuela, por su incondicional apoyo a lo largo de todo el proyecto y por dar una visión progresista a la aplicación de métodos geofísicos. Lilia Vierma por toda su paciencia, su amplio conocimiento en arqueología e historia y por apoyar la aplicación de Geofísica en estudios arqueológicos. Aldo Cataldi por su iniciativa y todos sus consejos.

Al equipo de TRX Consulting, especialmente Eduard Durán y Dayana Pacheco por toda la labor del trabajo de campo y los conocimientos en el uso del GPR. A todos los que trabajan en la Iglesia de Santa Ana del Norte por la ayuda en la adquisición, sus historias, su amabilidad y por ayudar a recuperar un valioso espacio histórico.

Al personal del Instituto de Patrimonio Cultural, Gregory Vertullo por toda su asesoría y colaboración, Juan Carlos León en su continuo interés a lo largo del desarrollo del proyecto y al resto del equipo que atentamente presencian el desarrollo de la geofísica como herramienta en su labor.

A la Arquitecto María Victoria Herrera por su valiosa colaboración en las dudas del proceso de interpretación, mostrando gran humildad e interés.

A José M. Carcione por el asesoramiento en casos avanzados de GPR.

Al Departamento de Geofísica, un lugar lleno de grandes ideas. A los grandes amigos y compañeros a lo largo de toda la carrera, en especial Ana Mercedes Freites y Clemente Pérez, en las buenas y en las malas hemos sido un gran equipo.

Por último y no menos importantes mis padres y mi familia, su apoyo incondicional ha hecho todo esto posible.

Romero P. Juanpablo L.

PROSPECCIÓN GEOFÍSICA APLICANDO GPR EN LA IGLESIA SANTA ANA DEL NORTE, MUNICIPIO GÓMEZ, ESTADO NUEVA ESPARTA

Tutor Académico: Prof. Nuris Orihuela; Cotutor: Antrop. Lilia Vierma;

Tutor Industrial: Ing. Aldo Cataldi.

Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Departamento de Geofísica. Año 2009. 115 p.

Palabras Claves: GPR, Georadar, Iglesia Santa Ana del Norte, arqueología, métodos electromagnéticos.

Resumen

Los métodos de prospección geofísica permiten identificar objetos en diversas disciplinas a diferentes escalas, dicha cualidad ha sido útil en actividades relacionadas con Arqueología debido a que de una manera no invasiva ayuda a definir lugares de interés a ser estudiados posteriormente.

La iglesia ubicada en Santa Ana del Norte, municipio Gómez del Estado Nueva Esparta, es un templo en proceso de restauración en el cual se realizó un estudio para caracterizar lugares de potencial interés arqueológico utilizando prospección geofísica somera, específicamente aplicando GPR o Georadar.

El estudio consistió en adquirir perfiles con GPR en el interior del templo y sus inmediaciones mediante mallados compuestos por líneas transversales y longitudinales a la estructura del templo, con separación entre líneas de 25 cm y arreglos de antenas multicanal de 1600 Mhz, 600 Mhz y 200 Mhz. En total se adquirieron para el área en estudio 3620 líneas.

Los datos adquiridos permiten la visualización en radargramas, visualización 3D y tomografías en planta. Las anomalías se caracterizaron

según sus características y sus posibles causas como terrenos perturbados, elementos estructurales, fundaciones, anomalías puntuales, cavidades y tuberías.

Con los resultados obtenidos se realizó un modelo tridimensional de anomalías en toda el área estudiada, el análisis se realiza mediante la división de las áreas internas y externas para relacionar con el contexto histórico y arqueológico del templo.

El alcance en profundidad logrado es de 1,5 cm con alta teniendo como factor determinante las condiciones del terreno y la presencia de elementos causantes de ruido como las mallas metálicas en el piso de la iglesia.

El GPR ha mostrado ser una herramienta de gran utilidad en la identificación de zonas de interés arqueológico. Algunas anomalías presentes no logran ser relacionadas con el contexto histórico debido a la falta de documentación encontrada. El continuo trabajo interdisciplinario entre geofísicos y arqueólogos es un factor importante en el logro de los objetivos planteados en este tipo de investigaciones, así como la integración de métodos de prospección geofísica en un área.

TABLA DE CONTENIDOS

Contenido	Pág.
Resumen.....	vi
Tabla de contenidos.....	viii
Lista de figuras.....	xi
Lista de tablas.....	xvi
Lista de apéndices.....	xvii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	18
1.1 Planteamiento del problema.....	18
1.2 Objetivos.....	20
1.2.1 Objetivo general.....	20
1.2.2 Objetivos específicos.....	20
1.3 Justificación.....	21
CAPÍTULO II. MARCO GEOLÓGICO, HISTORICO Y ARQUEOLÓGICO.....	22
2.1 Ubicación del área en estudio.....	22
2.2 Geología regional.....	23
2.3 Geología local.....	24
2.4 Consideraciones históricas y arqueológicas.....	24
CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO.....	30
3.1 Geofísica de prospección aplicada en arqueología.....	30
3.2 Propiedades electromagnéticas de los materiales.....	32
3.2.1 Conductividad eléctrica.....	32
3.2.2 Permitividad dieléctrica.....	33
3.2.3 Permeabilidad magnética.....	33
3.3 GPR (Ground Penetrating Radar) o Georadar.....	36
3.4 Parámetros para adquisición de datos.....	38
3.4.1 Arreglos de adquisición.....	40
3.5 Parámetros de procesamiento de datos.....	43

3.5.1 Pre-procesamiento.....	44
3.5.2 Ganancia.....	46
3.5.3 Filtrado.....	47
3.5.4 Procesamiento avanzado.....	49
CAPÍTULO IV. MÉTODO.....	52
4.1 Adquisición.....	52
4.1.1 Distribución espacial de secciones.....	52
4.2 Materiales y equipos.....	55
4.3 Mediciones en campo.....	56
4.4 Controles de calidad.....	57
4.5 Procesamiento.....	58
4.6 Interpretación.....	60
4.6.1 Terreno perturbado	60
4.6.2 Elemento estructural.....	61
4.6.3 Tubería.....	61
4.6.4 Fundación o zapata.....	62
4.6.5 Cavidad	62
4.6.6 Anomalías puntuales.....	63
4.6.7 Placa de concreto.....	63
CAPÍTULO V. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	65
5.1 Áreas Externas.....	69
5.1.1 Área 1A. Oeste de la iglesia, entrada principal.....	69
5.1.2 Área 1B. Sur de la iglesia.....	71
5.1.3 Área 1C. Sur de la torre.....	75
5.1.4 Área 1D. Jardín al este de la torre.....	77
5.1.5 Área 1E. Este de la iglesia.....	80
5.1.6 Área 1F. Norte de la iglesia.....	83
5.2 Áreas Internas.....	86
5.2.1 Área 2A. Parte interior norte.....	86
5.2.2 Área 2B. Parte interior sur.....	90

5.2.3 Área 3. Cuarto norte.....	94
5.2.4 Área 4. Altar principal.....	96
5.2.5 Área 5. Cuarto Sur.....	98
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	100
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS.....	103
APENDICES.....	107

INDICE DE FIGURAS

Contenido	Pág.
Fig. 1. Ubicación del área en estudio.....	22
Fig. 2. Geología Regional (Modificado de Urbani et al, 2005).....	23
Fig. 3. Fachada principal en el año 2003 (Tomado de Villarroel, 2003).....	25
Fig. 4. Situación actual de la fachada principal.....	26
Fig. 5. Daños y deterioro estructural en el templo.....	27
Fig. 6. Enterramiento primario encontrado en los exteriores de la Iglesia (Vertullo,2006).....	28
Fig. 7. Iglesia Santa Ana sin techo.....	29
Fig. 8. Simulación y descubrimiento de tumbas (Tomado de Baradello et al, 2004).....	32
Fig. 9. Modificación de un campo magnético en presencia de a) material ferromagnético, b) material diamagnético y c) material paramagnético (modificado de sitio web cobaes).....	34
Fig. 10. Ilustración de incidencia normal de la onda electromagnética.....	36
Fig. 11. Modos básicos de operación de GPR (Modificado de Annan, 2001).....	37
Fig. 12. Esquema de funcionamiento de GPR (Tomado de Cataldi, 2000).....	37
Fig. 13. Esquema del flujo de la señal a través del sistema (Modificado de Annan, 2001).....	39
Fig. 14. Grabación de amplitud en función del tiempo (Tomado de Annan, 2001).....	40
Fig. 15. Arreglo Monoestático (modificado de Baradello, 2003).....	40
Fig. 16. Arreglo Biestático (modificado de Baradello, 2003).....	41

Contenido	Pág.
Fig. 17. Espaciamiento entre perfiles para un mismo objetivo (Tomado de Zurita y Cataldi, 2002).....	43
Fig. 18. Corrección de tiempo inicial, a) Radargrama sin corrección, b) Radargrama con la corrección aplicada.....	45
Fig. 19. Ajuste velocidad utilizando hipérbola sintética.....	45
Fig. 20. Ilustración de dispersión de la señal y amplitud de la señal en función del tiempo (modificado de Annan, 2001).	46
Fig. 21. Aplicación de ganancia, a) Radargrama sin ganancia aplicada, b) Radargrama con ganancia aplicada	47
Fig. 22. Esquema de filtro paso bajo.....	48
Fig. 23. Esquema de filtro paso alto.....	48
Fig. 24. Esquema de filtro pasa banda.....	49
Fig. 25. Esquema de filtro Notch.	49
Fig. 26. Apuntalamiento temporal en el interior del templo.....	52
Fig. 27. Ilustración de mallado GPR en un sistema cartesiano referenciado a la estructura del templo.....	53
Fig. 28. Disposición espacial de las áreas estudiadas.....	54
Fig. 29. Colocación de marcas en la superficie para definir el mallado.....	56
Fig. 30. Adquisición de datos con GPR.....	57
Fig. 31. Visualización 3D de radargramas (izquierda) e imagen tomográfica (derecha).....	59
Fig. 32. Radargrama en que se visualiza una anomalía de terreno perturbado.....	60

Contenido	Pág.
Fig. 33. Radargrama en que se visualiza una anomalía asociada a un elemento estructural.....	61
Fig. 34. Radargrama en que se visualiza una anomalía asociada a una tubería..	61
Fig. 35. Radargrama en que se visualiza una anomalía asociada a una zapata..	62
Fig. 36. Radargrama en que se visualiza una anomalía de aire asociada a una cavidad.....	63
Fig. 37. Radargrama en que se visualiza un piso de terracota con malla metálica.	64
Fig. 38. Radargrama en que se visualiza un piso de concreto sin malla metálica.	64
Fig. 39. Mapa de ubicación de líneas adquiridas.	65
Fig. 40. Mapa de ubicación de líneas adquiridas respecto a la división por áreas.	66
Fig. 41. Ubicación de diferentes pisos de la Iglesia.	67
Fig. 42. Ubicación de anomalías en el templo.	68
Fig. 43. Anomalías de la zona oeste de la iglesia (área 1A).	69
Fig. 44. Izquierda: fachada de la Iglesia en 1979 (tomado de Villarroel, 2003). Derecha: fachada del templo en 2009.....	71
Fig. 45. Anomalías de la zona sur de la iglesia (área 1B).....	71
Fig. 46. Detalle de la falsa columna demolida vista desde la parte sur del templo (tomada de Villarroel, 2003).....	73

Contenido	Pág.
Fig. 47. Enterramiento directo encontrado en puerta lateral (tomada de Vertullo, 2006).....	74
Fig. 48. Excavación en la base de la torre (Fotografía de Vertullo G.).....	74
Fig. 49. Anomalías al sur de la Torre (área 1C).....	75
Fig. 50. Anomalías en el jardín al este de la Torre (área 1D).....	77
Fig. 51. Izquierda: jardín en 1979. Derecha: jardín 1984 (tomado de Villarroel, 2003).....	79
Fig. 52. Jardín al este de la torre en 2009.	79
Fig. 53. Anomalías en la zona este de la iglesia (área 1E).....	80
Fig. 54. Apertura de agujeros destinados a la construcción (fotografía de Piñero V., 2007).....	82
Fig. 55. Anomalías en la zona norte de la iglesia (área 1F).....	83
Fig. 56. Demolición de pavimento noroeste (tomado de Villarroel, 2003).....	85
Fig. 57. Anomalías en la zona norte del interior de la iglesia (área 2A).....	86
Fig. 58. Modificación del piso de la nave norte con la presencia de losas sepulcrales (tomado de Villarroel, 2003).....	88
Fig. 59. Anomalías ubicadas en la puerta de acceso interno a la nave norte.....	89
Fig. 60. Anomalías en la zona norte del interior de la iglesia (área 2B).....	90
Fig. 61. Excavación en la entrada lateral del templo (Fotografía de Vertullo G.2007).	93
Fig. 62. Anomalías en cuarto norte (área 3).	94

Contenido	Pág.
Fig. 63. Anomalías en altar principal (área 4).	96
Fig. 64. Losa ubicada en el altar del templo.	97
Fig. 65. Anomalías en cuarto sur (área 5).	98

LISTA DE TABLAS

Contenido	Pág.
Tabla 1. Valores de propiedades electromagnéticas, velocidad y atenuación de la señal electromagnética (Tomado de Pérez, 2007).....	35
Tabla 2. Clasificación de anomalías de la zona oeste de la iglesia (área 1A).....	70
Tabla 3. Clasificación de anomalías de la zona sur de la iglesia (área 1B).....	72
Tabla 4. Clasificación de anomalías al sur de la Torre (área 1C).....	76
Tabla 5. Clasificación de anomalías en el jardín al este de la Torre (área 1D)...	78
Tabla 6. Clasificación de anomalías en la zona este de la iglesia (área 1E).....	81
Tabla 7. Clasificación de anomalías en la zona norte de la iglesia (área 1F).....	84
Tabla 8. Clasificación de anomalías en la zona norte del interior de la iglesia (área 2A).....	87
Tabla 9. Clasificación de anomalías en la zona norte del interior de la iglesia (área 2B).....	91
Tabla 10. Clasificación de anomalías en cuarto norte (área 3).....	95
Tabla 11. Clasificación de anomalías en altar principal (área 4).....	96
Tabla 12. Clasificación de anomalías en cuarto sur (área 5).....	99

LISTA DE APENDICES

Contenido	Pág.
Fig. 66. Vista desde el suroeste del modelo de anomalías en el templo.....	108
Fig. 67. Vista desde el sureste del modelo de anomalías en el templo.....	109
Fig. 68. Vista superior del modelo de anomalías sin la planta del templo.....	110
Fig. 69. Vista inferior desde el suroeste del modelo de anomalías en el templo.....	111
Fig. 70. Vista inferior del modelo de anomalías en el templo.....	112
Fig 71. Planta de la iglesia Santa Ana del Norte.....	113
Fig. 72. Ubicación de perforaciones del estudio geotécnico (tomado de Sánchez, 2003).....	114
Fig. 73. Perfil geotécnico generalizado (modificado de Sánchez, 2003).....	115

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Los estudios de prospección geofísica son actualmente una parte esencial en la búsqueda e identificación de objetos de interés en diversas disciplinas a diferentes escalas. Estos estudios se realizan mediante la aplicación de métodos que se basan en la caracterización de propiedades y fenómenos físicos existentes en el subsuelo.

La prospección geofísica ha demostrado ser de gran utilidad en actividades petroleras, mineras, ambientales, geotécnicas, amenazas naturales y en disciplinas altamente invasivas como la Arqueología, para la cual la aplicación de técnicas geofísicas no invasivas optimiza los procesos de excavación mediante la identificación previa de lugares de interés. De igual forma los métodos de prospección geofísica pueden llegar a ser la única herramienta disponible para caracterizar fundaciones y elementos enterrados en edificios históricos, iglesias, mezquitas, pirámides, parques, edificios modernos, etc. que sean de interés arqueológico y que no puedan realizarse excavaciones ni intervenciones destructivas.

Mediante los diversos métodos de prospección geofísica pueden identificarse previamente artefactos, paredes cubiertas, calles antiguas, agujeros, túneles, enterramientos, etc. lo que permite realizar una planificación de excavaciones que realizadas de manera tradicional, pueden durar desde meses hasta décadas. Por el contrario, el uso de la prospección geofísica se traduce en un significativo ahorro del tiempo, especialmente vital en los lugares que serán afectados por obras, cuyo plazo para la evaluación arqueológica suele ser limitado.

Entre los diversos métodos de prospección geofísica una de las técnicas que permite obtener información de forma eficiente, rápida, precisa

y con alta resolución a niveles poco profundos es la utilización del radar de penetración terrestre o GPR (Ground Penetrating Radar) (*Chinchilla, 2006*), ésta técnica ha sido ampliamente utilizada en estudios arqueológicos a nivel mundial; sin embargo, hasta el momento no se ha aprovechado su potencial en los estudios arqueológicos en Venezuela.

La incorporación de métodos de prospección geofísica como el gravimétrico y sísmico en exploraciones arqueológicas en Venezuela datan de fechas recientes, iniciándose con el trabajo realizado por Herrera et al. (2002), con la utilización de gravimetría en la Iglesia de San Rafael de Orituco y el trabajo de Sesto (2008) con el uso de métodos eléctricos en El Cementerio de los Ingleses en Aroa. Sin embargo, es posible emplear otros métodos geofísicos que pueden resultar muy útiles para objetivos de estudios arqueológicos si las condiciones son adecuadas.

En el país se cuenta con un gran número de lugares de gran relevancia histórica que son de interés arqueológico; sin embargo, algunos han alcanzado altos niveles de deterioro por falta de cultura de preservación y mantenimiento. Normalmente estos monumentos patrimoniales requieren intervenciones interdisciplinarias para su recuperación y puesta en uso social; sin embargo, ha sido tan pernicioso las intervenciones como el abandono y los agentes erosivos ambientales. De tal manera, para evitar intervenciones destructivas innecesarias y hacerlas de modo más eficientes el Instituto de Patrimonio Cultural (IPC), ente rector a nivel nacional en materia de patrimonio cultural, consciente de la situación inició esfuerzos para dictar lineamientos respecto a la incorporación de estudios de prospección geofísica en los estudios arqueológicos que se realicen en monumentos patrimoniales, incluyendo proyectos de reconstrucción de edificios en condiciones de ruinas con la finalidad de respetar al máximo el patrimonio y lograr una mínima alteración del significado y contexto histórico del lugar.

La Iglesia de la población de Santa Ana, motivo central del proyecto, es uno de esos monumentos históricos que ha sufrido intervenciones altamente invasivas y consideradas inadecuadas; actualmente presenta daños irreversibles en su estructura manteniéndose parcialmente en pie con apuntalamientos y soportes secundarios, en el cual se ha iniciado el proyecto de reconstrucción, para el que es necesario un conocimiento previo de la localización de elementos de interés arqueológico, algunos de los cuales han sido descubiertos mediante las intervenciones previas.

El GPR constituye una herramienta que puede emplearse con la finalidad de identificar zonas de interés arqueológico en las cuales podrían llevarse a cabo intervenciones selectivas en la Iglesia de Santa Ana del Norte, Municipio Gómez, Estado Nueva Esparta.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Caracterizar lugares de potencial interés arqueológico utilizando prospección geofísica somera, en la Iglesia Santa Ana del Norte, Municipio Gómez, Estado Nueva Esparta.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Realizar secciones con GPR del templo y sus inmediaciones.
2. Generar imágenes en planta a diferentes profundidades.
3. Realizar la interpretación de mapas y secciones.
4. Realizar un modelo del subsuelo con la ubicación de los lugares de interés.
5. Contrastar documentación y resultados de investigaciones arqueológicas e históricas previas del templo.

1.3 Justificación

El proyecto constituye una oportunidad inédita en el país para la aplicación de una técnica de prospección geofísica somera, como acompañamiento de la exploración arqueológica, para definir y delimitar lugares de interés, cuyos resultados permitirán a los especialistas planificar las excavaciones y agilizar el proceso de comprensión integral de los problemas y constitución del monumento, haciéndolo menos invasivo a los valores históricos y evitando la perturbación del patrimonio cultural de la nación.

El trabajo representa un avance en la aplicación de la geofísica de prospección en estudios arqueológicos cumpliendo los estándares modernos de preservación del patrimonio de lugares históricos, siguiendo con el objetivo de incorporar a todos los estudios arqueológicos herramientas geofísicas, mejorando el entendimiento y la coordinación entre los profesionales de ambas áreas.

Se incluye por primera vez en Venezuela la técnica de GPR en estudios arqueológicos incorporando en igualdad de condiciones herramientas y resultados de otras ramas de la ciencia, ampliando el horizonte de acción para la presente y futuras generaciones de geofísicos y profesionales afines a la geofísica de prospección.

CAPÍTULO II. MARCO GEOLÓGICO, HISTORICO Y ARQUEOLÓGICO

2.1 Ubicación del área en estudio

La Iglesia Santa Ana del Norte se ubica en el centro poblado de Santa Ana del Norte, capital del Municipio Gómez del Estado Nueva Esparta (figura 1). Es una edificación religiosa propiedad de la Diócesis de Margarita. La extensión del área en estudio es de aproximadamente 900 m² constituidos por el templo y sus inmediaciones.

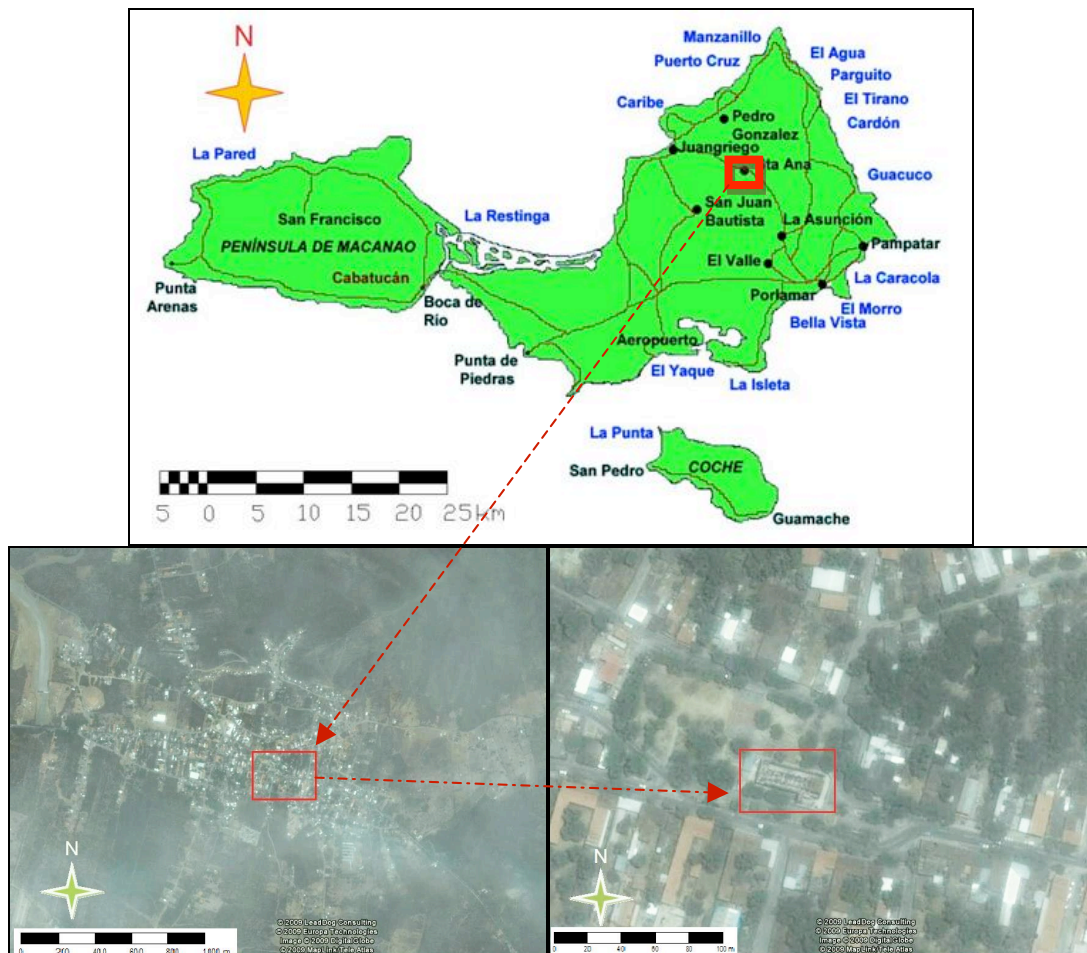


Figura 1. Ubicación del área en estudio

La población de Santa Ana del Norte está emplazada en un valle extenso. La morfología es factor limitante para el desarrollo urbano, las pequeñas colinas al norte y el Río Tacarigua al sur definen los límites del poblado. El desarrollo es mayormente a lo largo del eje vial La Asunción-Juan Griego.

2.2 Geología Regional

La geología regional de la zona de interés como se muestra en la figura 2 está caracterizada por aluviones y rocas del Grupo Juan Griego, las cuales son rocas de origen sedimentario metamorfozadas en las facies de los esquistos verdes, litológicamente se definen como gneises cuarcíticos, esquistos cuarzo-feldespáticos, esquistos cuarzo-micáceos, esquistos grafitosos, esquistos granatíferos y cuarcitas.

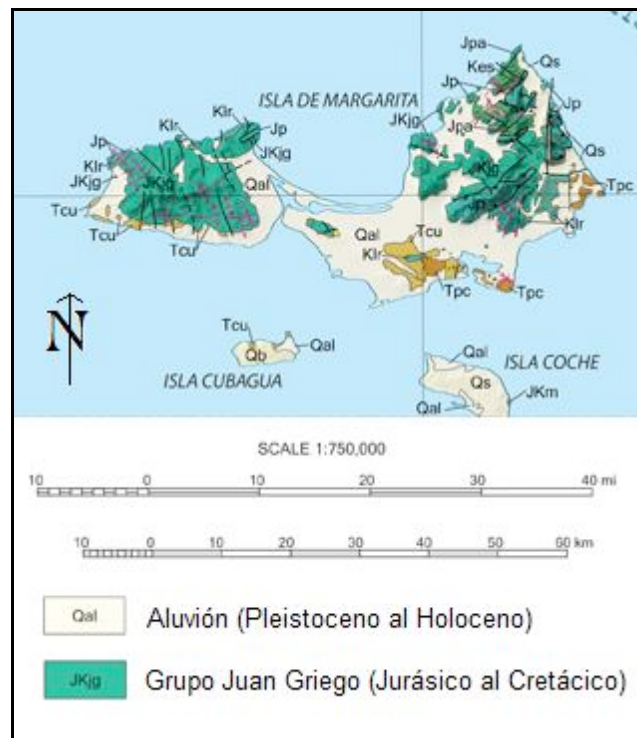


Figura 2. Geología Regional (Modificado de Urbani et al; 2005)

2.3 Geología Local

Localmente según el estudio geotécnico realizado por Sánchez (2003), en el cual se realizaron cuatro (4) perforaciones de hasta diez (10) metros de profundidad, el subsuelo está constituido principalmente por arenas mal gradadas, arcillosas y/o limosas a veces con grava, ocasionalmente con presencia de estratos de arcilla de plasticidad media a alta.

Superficialmente se encuentra una capa de relleno al norte del Templo con espesor poco mayor de un (1) metro constituido por suelos de diferentes granulometrías.

Para la fecha en que se realizaron las perforaciones no se detectó el nivel freático en la profundidad alcanzada.

2.4 Consideraciones Históricas y Arqueológicas

El centro poblado de Santa Ana del Norte fue fundado por Diego Vásquez Coronado en 1530 bajo el nombre de “Pueblo del Norte”, y fue en 1973 cuando fue refundado bajo el nombre actual (*Vertullo, 2006*).

La construcción de la iglesia se inició en el año 1749, antes de esa fecha había una iglesia pequeña, posiblemente una capilla, insuficiente para el número de fieles, españoles y guaiqueríes, que asistían a los oficios religiosos (*Márquez, 2005*). Fue inaugurada en 1752, hecha de mampostería y bahareque, techo de tejas y con una torre. Se encuentra orientada en dirección este-oeste con la entrada principal hacia el este. El templo está compuesto por una planta rectangular de 39,60 m x 13,80 m con tres (3) naves separadas por dos series de arcadas.



Figura 3. Fachada principal en el año 2003 (Tomado de Villarroel, 2003)

La Iglesia Santa Ana del Norte (figura 3) fue declarada Monumento Histórico Nacional el 8 de marzo de 1957 en Gaceta oficial No. 25.301 y No. 26.320 con fecha 2 de febrero de 1960. El templo fue sede de una Reunión de Notables el 6 de mayo de de 1816 donde se reconoce al Libertador Simón Bolívar como Jefe Supremo de la República y de sus ejércitos, se proclama a Mariño como segundo y se proclama a la República de Venezuela ***Una e indivisible*** (Vertullo, 2006). Al mismo tiempo es el lugar donde contraen nupcias el General Juan Bautista Arismendi y Luisa Cáceres.

El templo atravesó por modificaciones ligeras hasta 1930, fecha en la que se registra la primera intervención, en la cual se colocaron hileras de columnas en la nave central y se hizo una modificación del piso de ladrillo por uno de cemento, cubriendo grandes losas sepulcrales bajo las cuales estaban enterradas personas ilustres de gran figuración en la historia política y militar de Margarita. A principios de 1960 empezaron a notarse grietas en las paredes de la estructura y una nueva intervención se llevó a cabo a partir del día 7 de enero de 1962 (Márquez, 2005).

La restauración estuvo a cargo del Arq. Gasparini, en la cual además de la modificación de algunas decoraciones se destaca la demolición de la “casita para depósito” adosada a la torre debido a que no permitía apreciar del desarrollo de la escalera, así como la demolición correspondiente a la sacristía (Vertullo, 2006).



Figura 4. Situación actual de la fachada principal

Entre los años 1979 y 1984 se realizaron unas intervenciones y restauraciones y López (2004) realizó una evaluación estructural de arcos, muros y dinteles, enfocada a las condiciones estructurales y a los niveles de seguridad del momento, también indicó la relación de las grietas existentes con los sismos ocurridos a lo largo de la vida del templo junto con los deterioros causados por filtraciones y modificaciones realizadas en intervenciones anteriores. El mismo año se realizaron unas intervenciones puntuales y de escasas dimensiones como requisito para el proyecto de restauración, respecto a estas excavaciones se trataron de sondeos de 20 cm de profundidad mayormente con dimensiones desde 50 cm hasta 1,50 m en exploraciones en el suelo y muros, lo cual permitió obtener información

sobre la capa superficial de concreto colocada en el interior del templo, en la parte exterior en la zona del parque, al este, fueron encontrados unos restos óseos correspondientes a enterramientos primarios, al pie de la torre se encontraron acumulaciones de escombros presuntamente de trabajos anteriores hasta una profundidad de un metro (*Román, 2007*). Sin embargo, no se contó con suficiente tiempo para abordar todas las áreas de interés lo que motivó a mas excavaciones realizadas en el año 2006, las cuales se consideraron inadecuadas y no contaron con la autorización ni supervisión del Instituto de Patrimonio Cultural, así como control sobre método ejecutado (*Vierma, 2006*).



Figura 5. Daños y deterioro estructural en el templo.

Durante la intervención se excavó el terreno en la fachada lateral sur, para la construcción de zapatas para apoyo, durante ese proceso se encontraron una serie de restos óseos (figura 6) que pertenecen al cementerio de la iglesia, ubicado en los espacios exteriores de la misma; algunos de los restos fueron removidos por personal del IPC (*Vertullo, 2006*).

Existen diversas fuentes que han reportado la presencia de enterramientos en el recinto del templo, lo cual es de gran importancia para realizar la caracterización e identificación de lugares de interés en el presente trabajo. En la investigación realizada por la Lic. Villarroel en 2003 se citan testimonios que confirman importantes perturbaciones en el terreno “...por la costumbre de enterrar a los muertos en su recinto...”, y que en 1930 al realizar una modificación del templo se descubrió que en algunos lugares la tierra estaba llena de huesos humanos según el Monseñor Márquez.



Figura 6. Enterramiento primario encontrado en los exteriores de la Iglesia (Vertullo, 2006).

El lugar de sepultura ha sido un factor importante en la historia, la costumbre de enterrar a los cadáveres en el interior de los templos surgió con el Cristianismo; inicialmente se realizaban los entierros en iglesias parroquiales, expandiéndose posteriormente a nuevas iglesias y conventos. Para la organización de las tumbas individuales en el interior la planta se subdividía en tramos extendidos desde el presbiterio hasta el vestíbulo de la

entrada, a cada lugar se le asignaba un valor monetario. El tramo cercano al altar tenía el precio más alto y era reservado a sacerdotes y los miembros del clero; los niños se sepultaban en las naves laterales, mientras que los pobres y los esclavos en los tramos alejados del altar (*Zucchi, 2000*).

Entre otras modificaciones realizadas al templo se destaca el levantamiento de pisos para colocar un piso base de concreto, lo cual según cita Villarroel (2003), en su momento requirió de una excavación y reubicación de osamentas. También se señala la demolición de falsas columnas en las esquinas de la fachada frontal y el descubrimiento y limpieza de columnas así como la demolición del pavimento exterior para la colocación de terracota.

En el año 2007 un nuevo proyecto provisional de protección es presentado el cual tiene como objetivos la protección de las fundaciones del templo, las cuales fueron alteradas por las excavaciones realizadas para el vaciado de otros elementos estructurales, apuntalamiento de muros para la consolidación temporal, protección de las superficies, reparación de grietas y pisos, también la sustitución de la protección de los restos arqueológicos y la cubierta provisional para el templo al cual le fue removido el techo como se muestra en la figura 7 (*Caravallo, 2007*).



Figura 7. Iglesia Santa Ana sin techo.

CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO

3.1 Geofísica de prospección aplicada en arqueología

La arqueología ha contado con el apoyo de la geofísica desde mediados del siglo pasado cuando en 1946 se realizaron las primeras mediciones indirectas en superficie, sin embargo fue una década después que éstos adquieren desarrollo en países europeos, surgiendo el interés en algunos geofísicos de adecuar los métodos convencionales de prospección para aplicarlos a pequeña escala, para objetivos a poca profundidad y de pequeñas dimensiones. A la vista de los resultados obtenidos mediante la geofísica son muchos los arqueólogos a nivel mundial que solicitan la realización de estudios geofísicos en sus yacimientos a fin de optimizar el uso del tiempo y recursos económicos, pues pueden dirigir desde el primer momento la excavación a las zonas de interés detectadas (*Ponce et al; 2004*).

Los métodos geofísicos pueden dividirse en dos grupos según las fuentes utilizadas, en los métodos activos se emite una señal (ondas corpóreas, ondas electromagnéticas o corriente eléctrica) y se mide la respuesta del subsuelo a la señal enviada mientras los métodos pasivos se basan en la medición de propiedades como la gravedad, campo magnético, potencial eléctrico espontáneo y vibraciones naturales del terreno entre otras, sin la necesidad de utilizar fuentes de excitación del subsuelo (*Sesto, 2008*).

La aplicación de varios métodos geofísicos para una misma área en estudio es una práctica común y recomendada en algunos países debido a que cada método tiene sus ventajas y desventajas, y su aplicación varía según las condiciones del terreno y de los depósitos que se desean explorar

(Chinchilla y Heff, 2008). Si las condiciones no son favorables pueden obtenerse resultados poco significativos debido al escaso contraste de las propiedades medidas y como consecuencia no satisfactorias para dirigir la excavación. Así mismo algunas de las preguntas que se plantea la investigación arqueológica exigen detalles que no son apreciables mediante exploraciones geofísicas tales como diferencias leves entre sedimentos y algunas morfologías como los fragmentos de huesos (Dayton, 2004).

Algunos de los métodos más utilizados son los de resistividad del subsuelo en corriente continua (Sesto, 2008; Chinchilla y Heff, 2008; Dayton, 2004) dado que es uno de los más rentables y útiles ayudando a identificar rasgos de interés comprobados en excavaciones. El radar de penetración terrestre ha sido utilizado en la búsqueda de restos arqueológicos enterrados cerca de la superficie, probando ser un método rápido y de alta resolución si se utilizan antenas adecuadas, lo que resulta útil en la exploración arqueológica (Lorenzo y Hernández, 1995).

Señalado por autores como Baradello et al. (2004), el GPR es una herramienta valiosa para la localización de enterramientos y tumbas en estudios arqueológicos, los cuales realizaron simulación de la reflexión de ondas electromagnéticas para objetivos arqueológicos basándose en la analogía con las ondas acústicas (figura 8), lo cual ayuda a definir comportamientos y patrones para la discriminación y clasificación de anomalías encontradas. El sistema GPR es capaz de responder a objetos enterrados como tuberías, enterramientos primarios o secundarios así como también a suelos perturbados o removidos (Annan, 2001).

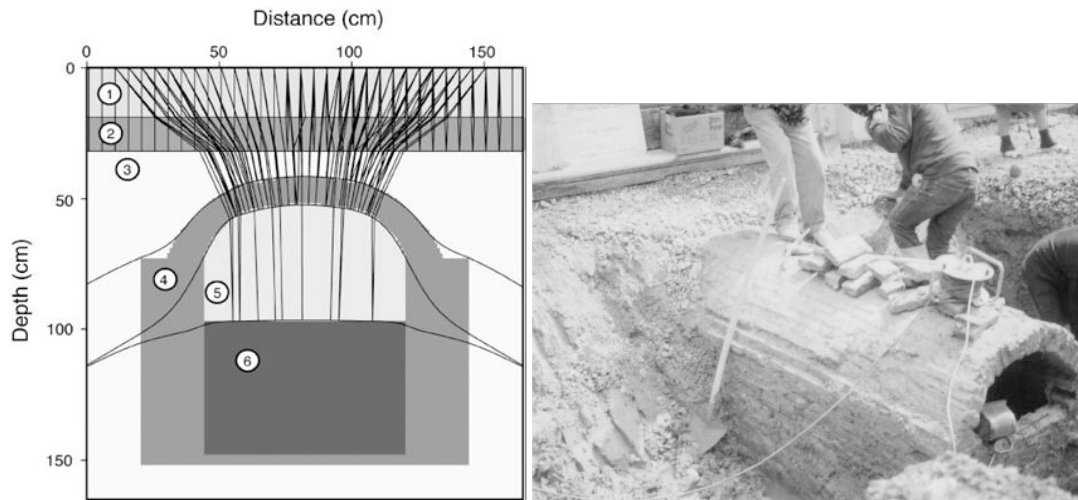


Figura 8. Simulación y descubrimiento de tumbas (tomado de Baradello et al, 2004).

3.2 Propiedades electromagnéticas de los materiales

Las propiedades eléctricas y magnéticas de un medio son cruciales en la aplicación de técnicas como el GPR, la cual detecta contrastes verticales y laterales de dichas propiedades. Las propiedades eléctricas de los suelos son altamente afectadas por factores como la humedad, porosidad, morfología, temperatura y composición química entre otros (*Wtorek, 2003*).

Las variables que definen el comportamiento electromagnético de un medio son conductividad, permitividad dieléctrica y permeabilidad magnética.

3.2.1 Conductividad Eléctrica: proporciona información de la respuesta de las cargas libres de un material en presencia de un campo eléctrico externo. Pueden clasificarse los materiales según su conductividad en conductores, semiconductores y aislantes.

- **Conductores:** son los materiales que transmiten mejor la electricidad debido a la mayor cantidad de electrones libres que permiten el movimiento de las cargas, generalmente son elementos metálicos.
- **Semiconductores:** son materiales capaces de conducir la electricidad mejor que un aislante pero sin llegar a ser como un

metal, dependiendo del campo eléctrico ante el cual es afectado y de la temperatura; la mayoría de los elementos en el subsuelo son semiconductores.

- **Aislantes:** materiales con escasa conductividad eléctrica debido a la escasez de electrones libres en su estructura.

3.2.2 Permitividad Dieléctrica: define la proporcionalidad entre la intensidad de un campo eléctrico externo aplicado y el vector de desplazamiento eléctrico. Proporciona un valor de respuesta de un material en presencia de un campo eléctrico externo.

3.2.3 Permeabilidad Magnética: relaciona la inducción magnética con la intensidad del campo magnético. Proporciona un valor de la susceptibilidad de un material a la magnetización (*Martin, 2004*). Los materiales se clasifican en ferromagnéticos, diamagnéticos y paramagnéticos.

- **Ferromagnéticos:** materiales que poseen un momento magnético permanente y manifiestan magnetizaciones permanentes.
- **Diamagnéticos:** son materiales que en presencia de un campo magnético externo experimentan momento magnético, el cual solo persiste en presencia del campo.
- **Paramagnéticos:** materiales que requieren de campos magnéticos de gran magnitud y temperatura elevada para presentar magnetización, por lo que se les considera no-magnéticos.

En la figura 9 se muestra un esquema de cómo se modifica un campo magnético al introducir materiales con diferentes permeabilidades magnéticas.

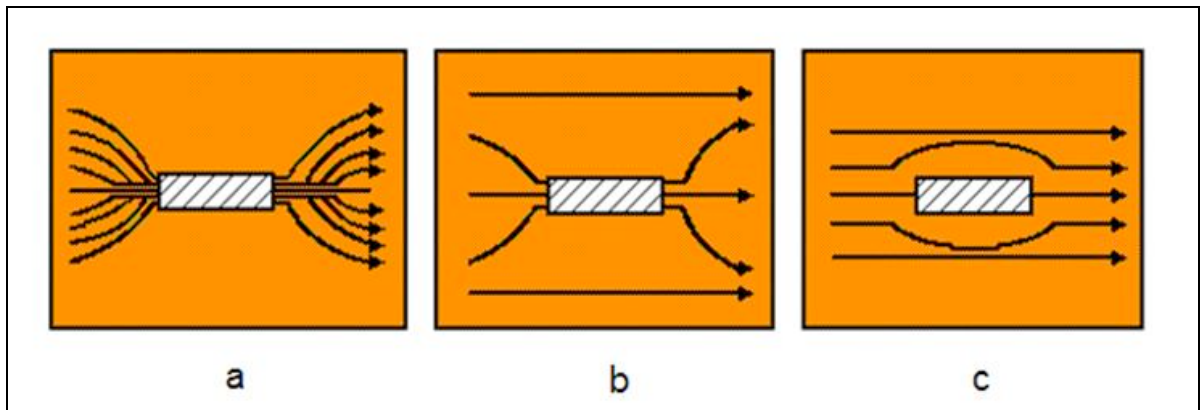


Figura 9. Modificación de un campo magnético en presencia de a) material ferromagnético, b) material diamagnético y c) material paramagnético (modificado de sitio web cobaes)

El siguiente cuadro muestra las propiedades electromagnéticas de algunos materiales, rocas y tipos de suelos.

Tabla 1. Valores de propiedades electromagnéticas, velocidad y atenuación de la señal electromagnética (tomado de Pérez, 2007)

Material	Conductividad (σ) [$\Omega \cdot m^{-1}$]	Permitividad Dieléctrica (ϵ_r)	Velocidad [m/ns]	Atenuación (α) [dB m ⁻¹]
Vacío	-	1	0,3	0
Aire	0	1,0006	$\approx 0,3$	0
Agua destilada	0,01	80	0,033	0,002
Agua natural	0,5	80	0,033	0,1
Agua de mar	30000	80	0,01	1000
Hielo	0,01	3 - 4	0,16	0,1
Permafrost	1 - 8	-	0,106 - 0,3	-
Arena seca	0,01	3 - 5	0,15	0,01
Arena saturada	0,1 - 1	20 - 30	0,06	0,03 - 0,3
Limo saturado	50	10	0,09	26
Limo	1 - 100	5 - 30	0,07	1 - 100
Arcilla saturada	500	10	0,09	260
Arcilla	2 - 1000	5 - 40	0,06	1 - 300
Caliza	0,5 - 2	4 - 8	0,12	0,4 - 1
Lutita	1 - 100	5 - 15	0,09	1 - 100
Granito	4 - 6	0,01 - 1	0,13	0,01 - 1
Cuarzo	-	4,3	0,145	-
PCV, Epoxy y poliester	-	3	0,173	-
Asfalto	-	3 - 5	0,134 - 0,173	-
Concreto	-	6 - 30	0,055 - 0,112	-

La mayor parte de las respuestas registradas por el GPR es por efecto de cambios en la impedancia eléctrica del medio en el cual viajan las ondas. En general la propiedad del material que ocasiona los contrastes de impedancia es la permitividad dieléctrica de los materiales, la cual es altamente susceptible a la porosidad y el contenido dentro de los poros de una roca. En el subsuelo los materiales son raramente homogéneos, y la composición suele ser compleja y variable. Otro de los factores que altera la respuesta de un medio es su densidad, especialmente cuando hay alto contenido de agua en el subsuelo, debido a que ésta guarda relación con la porosidad (Annan, 2001). En la figura 10 se ilustra la reflexión normal de la onda, lo cual involucra una interfase horizontal, siendo la energía que se refleja dependiente del contraste de impedancia de los medios.

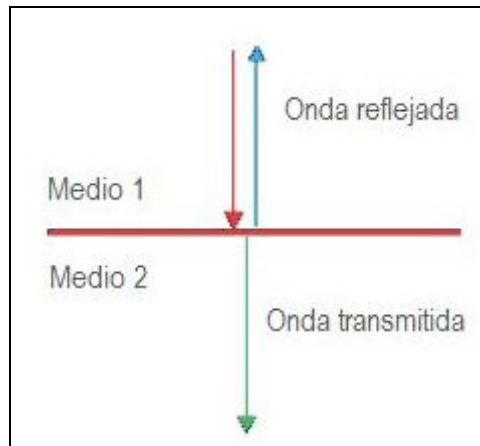


Figura 10. Ilustración de incidencia normal de la onda electromagnética.

3.3 GPR (Ground Penetrating Radar) o Georadar

Es el término general que se asigna a las técnicas que emplean ondas electromagnéticas, usualmente en un rango de frecuencia entre 1 y 2000 MHz, para la identificación de contrastes y heterogeneidades del subsuelo. Existen tres modalidades básicas para la aplicación de GPR (Figura 11)

siendo la más utilizada la reflexión con distancia fuente-receptor fija, mostrado en la figura 12 (Annan, 2001).

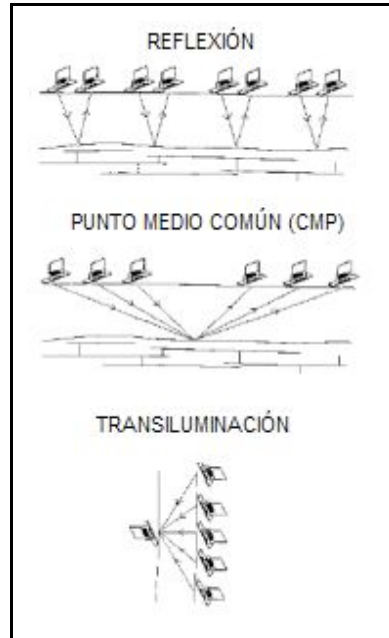


Figura 11. Modos básicos de operación de GPR (Modificado de Annan, 2001).

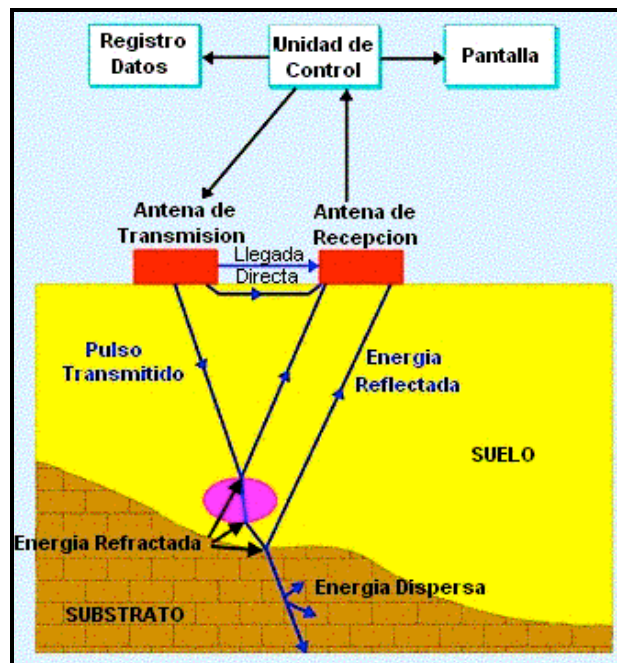


Figura 12. Esquema de funcionamiento de GPR (Tomado de Cataldi, 2000).

La técnica de GPR ha ganado importancia como método de prospección somera, siendo la única capaz de generar una imagen de alta resolución análoga a la sísmica de reflexión (*Zurita y Cataldi, 2002*). Es muy utilizada para las investigaciones en terreno urbano, condicionando la profundidad al tipo de antena utilizada y a la frecuencia de la misma así como de las propiedades electromagnéticas del subsuelo (*Bordehore, 2005*).

3.4 Parámetros para adquisición de datos

Para la prospección utilizando GPR es necesario tomar en cuenta una serie de factores como son:

- Tipo de objetivo
- Profundidad del objetivo
- Propiedades, geometría y dimensión del objetivo
- Condiciones del terreno y ruido cultural.

En función de los factores nombrados anteriormente se define el tipo de antenas a utilizar y el arreglo de las mismas en base a la resolución y profundidad necesarias y se diseña la geometría de adquisición.

Las antenas son los emisores y receptores de las ondas, pueden cumplir ambas funciones, se denominan biestáticas cuando solo cumplen una función y monostáticas cuando son capaces de realizar ambas. Las monostáticas son de dimensiones menores lo que las hace más portátiles que las biestáticas, mientras éstas últimas permiten realizar distintos tipos de arreglos de adquisición. También pueden clasificarse en Blindadas y No Blindadas, las primeras permiten mejor control sobre el ruido con mayor resolución mientras que las últimas alcanzan mayor profundidad a menor resolución (*Zurita y Cataldi, 2002*).

La frecuencia y el ancho de banda tanto del radar como de las antenas son de suma importancia en la resolución y profundidad del estudio, y está directamente relacionada con la señal que finalmente es grabada, como se muestra en la figura 13, la cual es el resultado de la función de transferencia de cada elemento del sistema en el cual existe flujo de la onda. La frecuencia de los componentes instrumentales se indica dando el valor central de su banda operativa.

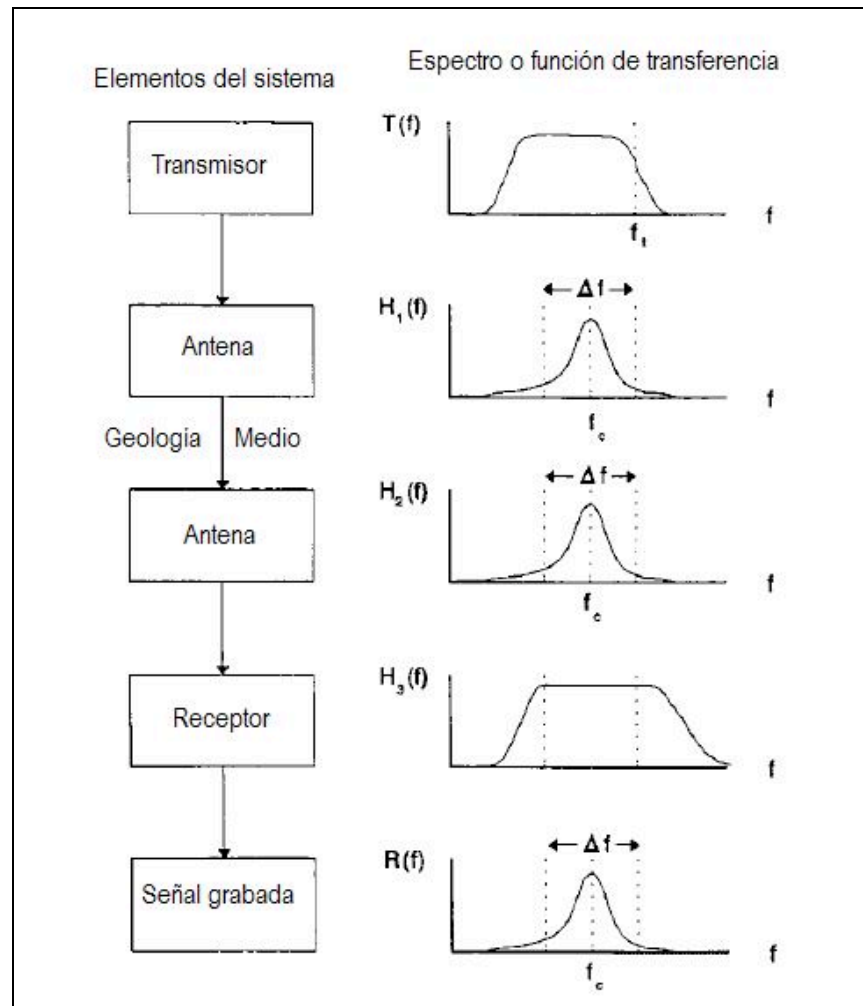


Figura 13. Esquema del flujo de la señal a través del sistema (Modificado de Annan, 2001).

3.4.1 Arreglos de adquisición

Para la adquisición de datos se utilizan diversos arreglos de antenas, la grabación de la amplitud de la señal se realiza en función del tiempo (figura 14) y los datos que se visualizan en los radargramas son las amplitudes de la señal que retorna en función del tiempo de viaje de la onda electromagnética a través del medio.

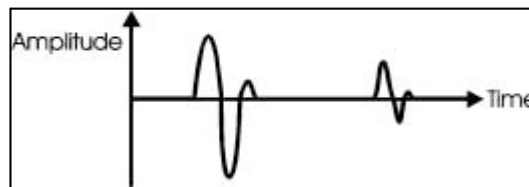


Figura 14. Grabación de amplitud en función del tiempo (Tomado de Annan, 2001).

A continuación se definen diferentes técnicas para adquisición de datos.

- **Monoestático:** se realiza con una antena, la cual incluye el emisor y receptor, que se desplaza sobre la superficie a velocidad constante, tomando medidas a intervalos de distancia predefinidos. Permite obtener buena resolución lateral a poca profundidad de prospección.

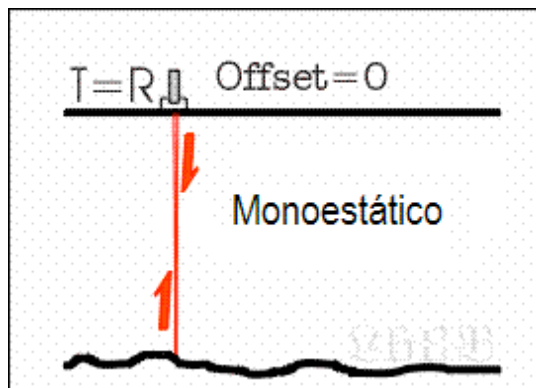


Figura 15. Arreglo Monoestático (Modificado de Baradello, 2003).

- **Biestático:** se realiza con una antena emisora y una receptora desplazadas a velocidad constante, la distancia entre las antenas se denomina offset y es un parámetro fijo durante la adquisición que se determina en función de los objetivos. La apertura entre emisor y receptor permite lograr mayor profundidad con menor contraste lateral y el punto de estudio en el subsuelo es el medio de las dos antenas o CMP cuando se estima un medio estratificado horizontalmente.

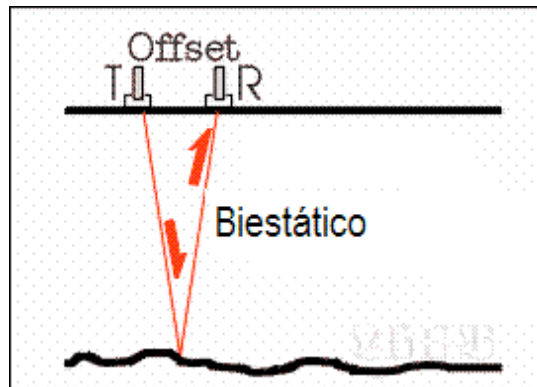


Figura 16. Arreglo Biestático (Modificado de Baradello, 2003).

- **Punto medio común (CMP):** una modificación del tipo biestático en el que la distancia entre fuente-receptor va aumentando mientras se mantiene un punto medio común. Mediante ésta técnica permite realizar un estudio de velocidad de propagación de la onda electromagnética para hacer la conversión de tiempo-profundidad de otros datos adquiridos con arreglos diferentes.
- **WARR (Wide Angle Reflection and Refraction):** arreglo de tipo biestático en el cual la antena transmisora se coloca en un punto fijo y la emisora se desplaza aumentando la distancia fuente-receptor. Posteriormente se mueve la antena trasmisora a la siguiente posición y se repite la medición hasta completar toda la sección. La información obtenida permite también realizar un análisis de velocidades ya que combina la configuración biestática con la de punto medio común.

- **SCO (Suma de offset comunes):** consiste en realizar un perfil inicial con distancia fuente-receptor constante variando dicho parámetro posteriormente y realizando el mismo perfil.
- **Transiluminación y tomografía:** se aplican en medios con superficies paralelas, en una superficie se coloca la antena receptora y en otra la antena emisora, una de las antenas permanece fija mientras la otra se desplaza a lo largo de la superficie. Permite obtener información sobre velocidad y atenuación del medio.
- **Multicanal:** consiste en realizar en el levantamiento de un perfil con antenas monostáticas de diferentes frecuencias para obtener varios radargramas de diferentes resoluciones y profundidades de exploración.
- **Crosspolar:** se utilizan antenas biestáticas separadas a distancia fuente-receptor constante mientras están orientadas perpendicularmente entre ellas.

La geometría de adquisición está definida por el intervalo de muestreo, el espaciamiento entre perfiles y la orientación de los mismos. El primer parámetro se define como la cantidad de muestras por distancia en un perfil mientras que el espaciamiento determina el número de perfiles del área en estudio (figura 17), dicho parámetro está directamente relacionado con la resolución espacial y debe ser menor al mínimo tamaño de los objetivos esperados. Para el estudio de objetivos de los cuales se desconoce su orientación se realizan mallados con perfiles perpendiculares entre sí con el fin de relacionar los eventos observados.

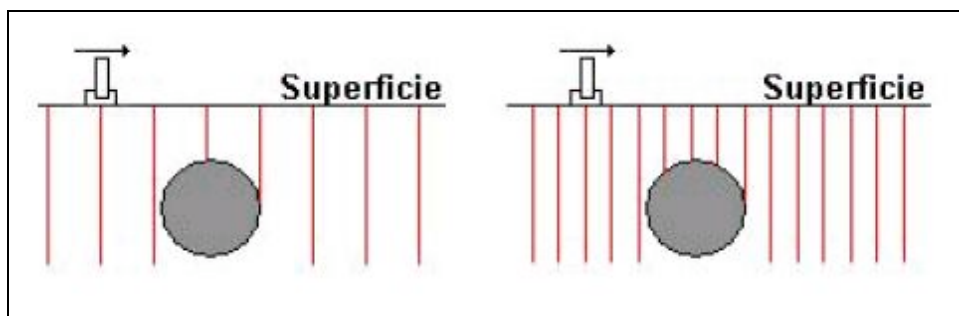


Figura 17. Espaciamiento entre perfiles para un mismo objetivo (Tomado de Zurita y Cataldi, 2002).

La velocidad de adquisición juega un importante papel en la adquisición con respecto a la resolución lateral, va a depender en gran parte de las condiciones del terreno y puede ser muy variable, cuando las antenas se colocan a una distancia de la superficie, mediante algún vehículo, la velocidad puede llegar a ser hasta de 40 km/h obteniendo poca resolución lateral. Cuando la antena está en contacto con la superficie la velocidad de desplazamiento alcanza un valor máximo de 2 km/h mejorando la resolución lateral de los datos (*Zurita y Cataldi, 2002*).

3.5 Parámetros de procesamiento de datos

Aunque los datos obtenidos pueden visualizarse en tiempo real es necesario aplicar un procesamiento con la finalidad de mejorar la imagen en el radargrama, corregir la atenuación de la señal y mejorar la relación señal-ruido. Las herramientas de procesamiento para datos de GPR son análogas a las utilizadas en la sísmica, asumiendo que el comportamiento de la onda electromagnética en el subsuelo es similar a la de las ondas acústicas; sin embargo, no todos los procesamientos sísmicos han de ser aplicados a datos de GPR (*Annan, 1999*).

Entre los factores que pueden causar ruido se pueden encontrar estructuras enterradas, señales externas de alta frecuencia (celulares,

microondas), cables de alta tensión y objetos sobre la superficie por la cual deben pasar las antenas, algunos efectos de dichas fuentes pueden eliminarse mediante la aplicación de filtros. El procesamiento es usualmente una actividad interactiva monitoreada continuamente por el procesador con la única finalidad de obtener la mejor visualización de los objetivos.

La serie de pasos a seguir se puede agrupar en tres etapas principalmente que son: pre-procesamiento, ganancia y filtraje, y su orden puede ser variado de acuerdo a las necesidades del procesador (*Zurita y Cataldi, 2002*).

El procesamiento básico no modifica de manera importante los datos ni causa distorsión en la información adquirida mientras que la utilidad de los procesamientos avanzados es resaltar señales débiles de eventos específicos que ayuden a la interpretación. También puede derivarse información cuantitativa acerca de la velocidad y atenuación en el perfil (*Annan, 1999*).

3.5.1 Pre-procesamiento

Corrección de tiempo inicial: es un movimiento temporal de las trazas del perfil tomando en cuenta el tiempo de la primera llegada de la onda electromagnética ya que la grabación del registro se inicia antes de la primera emisión de la fuente, de esta manera el tiempo inicial del radargrama coincide con el tiempo inicial de la señal y se elimina el efecto del aire (figura 18).

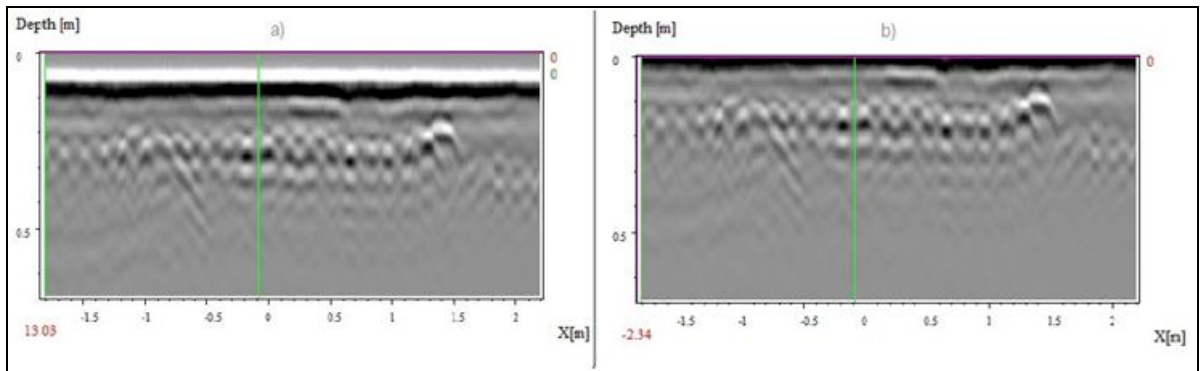


Figura 18. Corrección de tiempo inicial, a) Radargrama sin corrección, b) Radargrama con la corrección aplicada.

DC Removal: filtro en el dominio del tiempo para eliminar las bajas frecuencias causadas por la onda de aire o por posibles limitaciones en el rango dinámico de los instrumentos.

Cálculo de Velocidad: a partir de las hipérbolas de reflexión presentes en el radargrama, es un proceso interactivo en el que se ajusta la velocidad de la onda a partir de hipérbolas sintéticas hasta obtener un valor adecuado (figura 19).

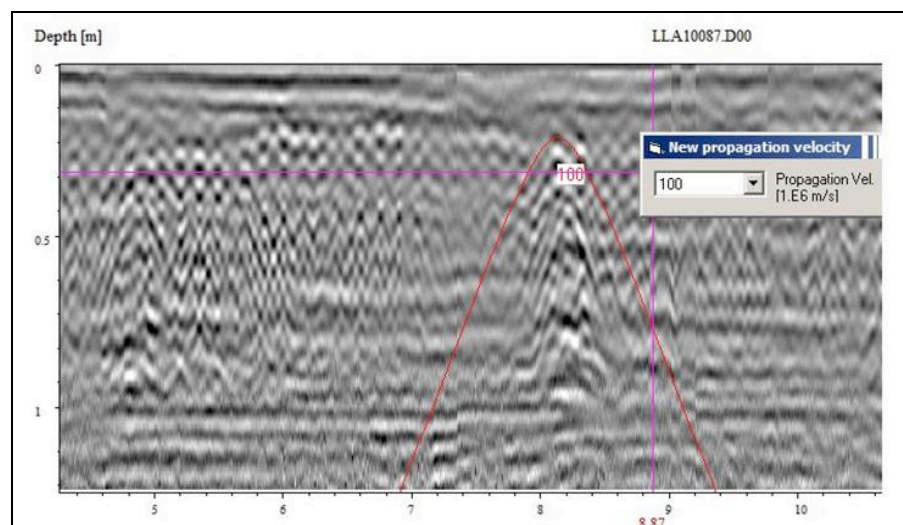


Figura 19. Ajuste velocidad utilizando hipérbola sintética.

3.5.2 Ganancia

Permite recuperar la energía atenuada durante el tiempo de propagación de la onda en el medio (figura 20). Existen diversas maneras de aplicar ganancia a los datos, generalmente se realiza el proceso a todas las trazas en base a una función de ganancia que puede ser lineal o exponencial, el objetivo es recuperar la mayor cantidad de señal posible evitando acentuar eventos causados por ruidos (figura 21).

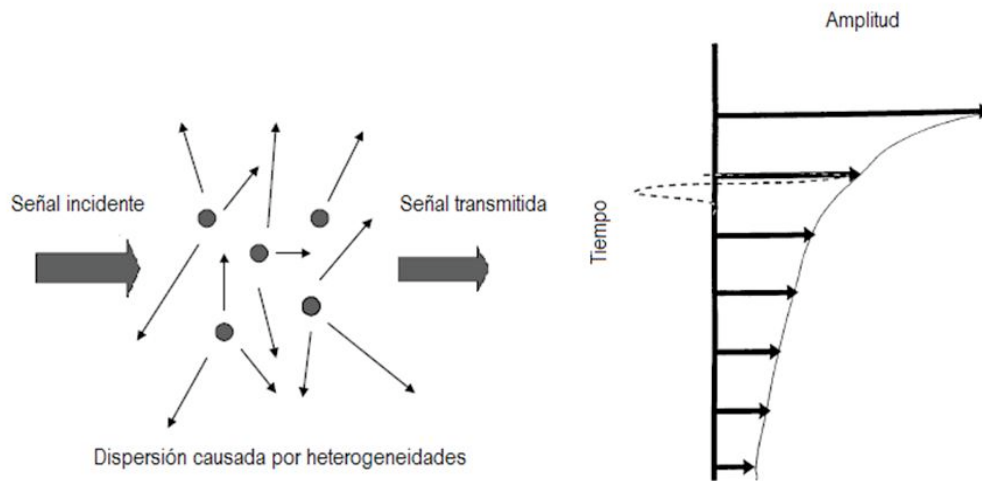


Figura 20. Ilustración de dispersión de la señal y amplitud de la señal en función del tiempo (Modificado de Annan, 2001).

Generalmente previo a la aplicación de ganancia se calcula, de ser posible, el espectro de amplitud vs tiempo para estudiar la atenuación en el medio y definir una función de ganancia adecuada. Luego de aplicada la ganancia puede tenerse un control visualizando un nuevo espectro de amplitud vs tiempo en adición a la visualización del radargrama.

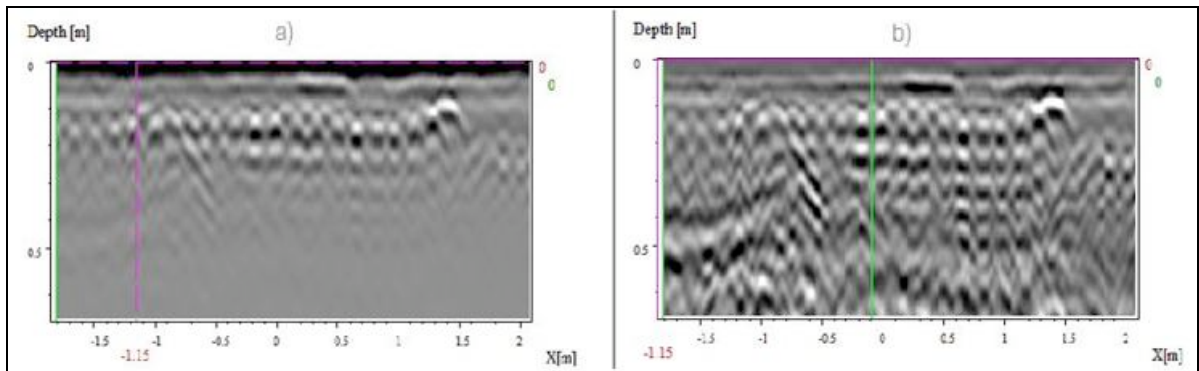


Figura 21. Aplicación de ganancia, a) Radargrama sin ganancia aplicada, b) Radargrama con ganancia aplicada.

Las ecuaciones de ganancia lineal y exponencial se indican a continuación:

$$t' = \alpha z t \text{ (Ganancia Lineal)} \quad (1)$$

$$t' = t e^{\alpha z} \text{ (Ganancia Exponencial)} \quad (2)$$

Donde

t' : Valor de amplitud al aplicar ganancia

α : Factor de ajuste

z : Profundidad

t : Valor de amplitud original

3.5.3 Filtrado

Es el proceso en el cual se intenta eliminar o reducir las señales consideradas ruidos y que no están relacionadas con la geología y los objetivos, estos pueden aplicarse a los datos en el dominio temporal o en el dominio de frecuencia.

Filtro paso bajo: es un filtro selectivo que atenúa o elimina las frecuencias por encima de un parámetro de corte y deja pasar las bajas frecuencias (figura 22).

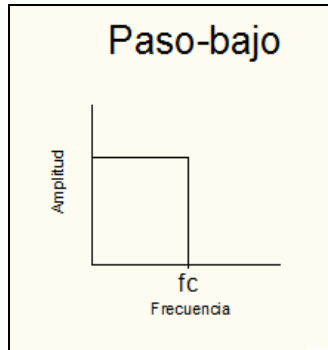


Figura 22. Esquema de filtro paso bajo.

Filtro paso alto: es un filtro selectivo que atenúa o elimina las frecuencias por debajo de un parámetro de corte y deja pasar las altas frecuencias (figura 23).

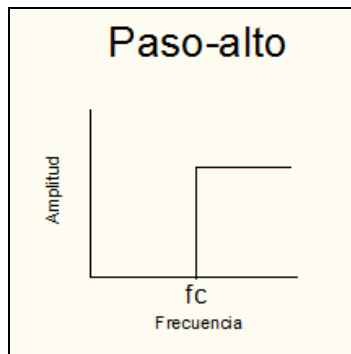


Figura 23. Esquema de filtro paso alto.

Filtro pasa Banda: es una combinación de un filtro paso bajo y un filtro paso alto (figura 24) en el cual la banda de paso está definida por un parámetro de corte bajo y uno de corte alto y las banda supresora se encuentra por fuera de estos valores (*Oppenheim y Willsky, 1998*).

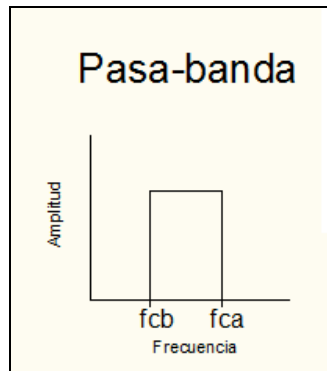


Figura 24. Esquema de filtro pasa banda.

Filtro Notch: utilizado para eliminar un rango de frecuencias definido, sin alterar el resto de la banda (figura 25). La diferencia respecto al filtro pasa-banda es que los parámetros de corte definen la banda supresora, quedando la banda de paso fuera de estos valores.

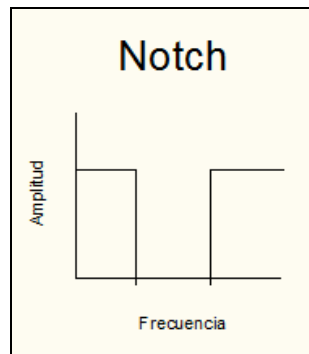


Figura 25. Esquema de filtro Notch.

3.5.4 Procesamiento avanzado

Existen también una variedad de procesamientos que son aplicados en ocasiones específicas o para algún tipo de objetivo que lo requiera, algunos se describen a continuación.

Deconvolución: se aplica para mejorar la resolución en algunos casos en los cuales hay reverberación por causas externas o por causas

instrumentales. Se deben tomar en cuenta diversos factores antes de aplicar algún algoritmo de deconvolución a datos de GPR debido a que a menudo la onda que emite el receptor es corta y comprimida para el ancho de banda instrumental y las condiciones de señal-ruido.

Background Removal (eliminación de fondo): filtro espacial paso alto que ayuda a eliminar el ruido causado por la reverberación de la onda debido a falta de acople con la superficie y por falta de horizontalidad, lo cual enmascara las señales más débiles de los eventos superficiales.

Análisis de velocidad por CMP (punto medio común): consiste en analizar la velocidad a partir de estudios de punto medio común para extraer funciones de velocidad vs tiempo lo que permite hacer una conversión tiempo-profundidad con el menor error posible así como tener velocidades interválicas que pueden compararse con estudios de velocidad de ondas electromagnéticas en diferentes litologías y materiales.

Migración: tiene la función de corregir el efecto de distorsión provocado por estructuras geológicas en el área estudiada. Existen diversos algoritmos para aplicar éste procesamiento y es necesario tener conocimiento, con la mayor exactitud posible, de la velocidad de propagación de la onda electromagnética en el medio. La migración es principalmente útil en zonas con alta complejidad estructural y cuando es necesario reducir los efectos de los reflectores desplazados por el buzamiento en estudios de estratigrafía.

Filtrado FK: mediante la transformada FK se pueden definir rangos de frecuencias de ruido o señales en aliasing las cuales pueden eliminarse aplicando filtros FK, con esto se logra mayor definición en elementos estructurales del subsuelo.

Atributos: procesos como la envolvente de Hilbert y la frecuencia instantánea aplicados en casos particulares en los cuales se desea estudiar la resolución espacial de los datos y la escala espacial de los objetivos respectivamente. En el caso de la envolvente de Hilbert ayuda a eliminar la falsa percepción de resolución causada por la oscilación del pulso del radar, siendo la envolvente del pulso el factor determinante de la resolución y no el período de la onda; el atributo genera una representación simple de la resolución espacial. La frecuencia instantánea puede ser un buen indicador de rasgos que responden selectivamente al espectro de la señal incidente, como una capa delgada en una secuencia estratigráfica si en la parte cercana a un adelgazamiento la frecuencia del pulso entra en resonancia con la del medio, provocando un incremento de la respuesta en dicha frecuencia particular (*Annan, 2001*).

CAPÍTULO IV. MÉTODO

4.1 Adquisición

La Iglesia de Santa Ana del Norte para el momento de adquisición presentaba un estado de deterioro considerable y notables efectos causados por las intervenciones realizadas. La estructura del templo fue el principal factor tomado en cuenta en el diseño del levantamiento, el cual se realizó mediante configuraciones de mallas referenciadas en un sistema cartesiano (figura 27) referido a la planta del templo.



Figura 26. Apuntalamiento temporal en el interior del templo.

4.1.1 Distribución espacial de secciones

En el área en estudio se establecieron en total once (11) mallas de adquisición (figura 28), formadas por líneas longitudinales y transversales a la estructura del templo. Para el arreglo multicanal con las antenas de 600 y 1600 Mhz el espaciamiento entre líneas es de 25 cm mientras que con el arreglo monoestático la antena de 200 Mhz el espaciamiento utilizado es de 50 cm entre líneas. En total se adquirieron 3620 líneas en el interior y el perímetro del templo.

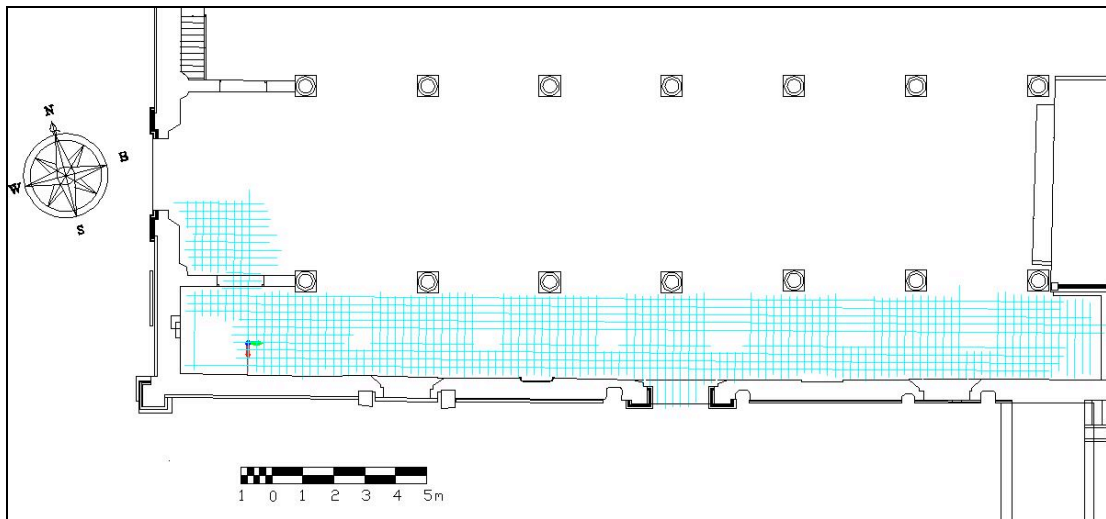


Figura 27. Ilustración de mallado GPR en un sistema cartesiano referenciado a la estructura del templo.

Una vez culminada la adquisición cada una de las mallas se referencia al mapa base del templo con las medidas tomadas en campo, obteniéndose el plano del levantamiento. La división por áreas del templo se define para permitir un desarrollo práctico del proceso de adquisición, debido a que resulta más sencillo adquirir mallados con una sola orientación preferencial de menor dimensión en áreas comunes de fácil acceso, que luego pueden referenciarse en la planta del templo.

La nomenclatura para las diferentes áreas del levantamiento se define a continuación:

- Áreas externas
 - Área 1A: entrada principal al oeste del templo.
 - Área 1B: sur del templo desde el lateral de la fachada principal hasta la pared de la torre.
 - Área 1C: sector sur y suroeste de la torre.
 - Área 1D: jardín al este de la torre.
 - Área 1E: sector este y esquina sureste del templo.
 - Área 1F: sector norte del templo

- Áreas internas
 - Área 2A: nave interior norte del templo.
 - Área 2B: nave interior sur del templo.
 - Área 3: cuarto norte al lado del altar.
 - Área 4: altar principal
 - Área 5: cuarto sur al lado del altar.

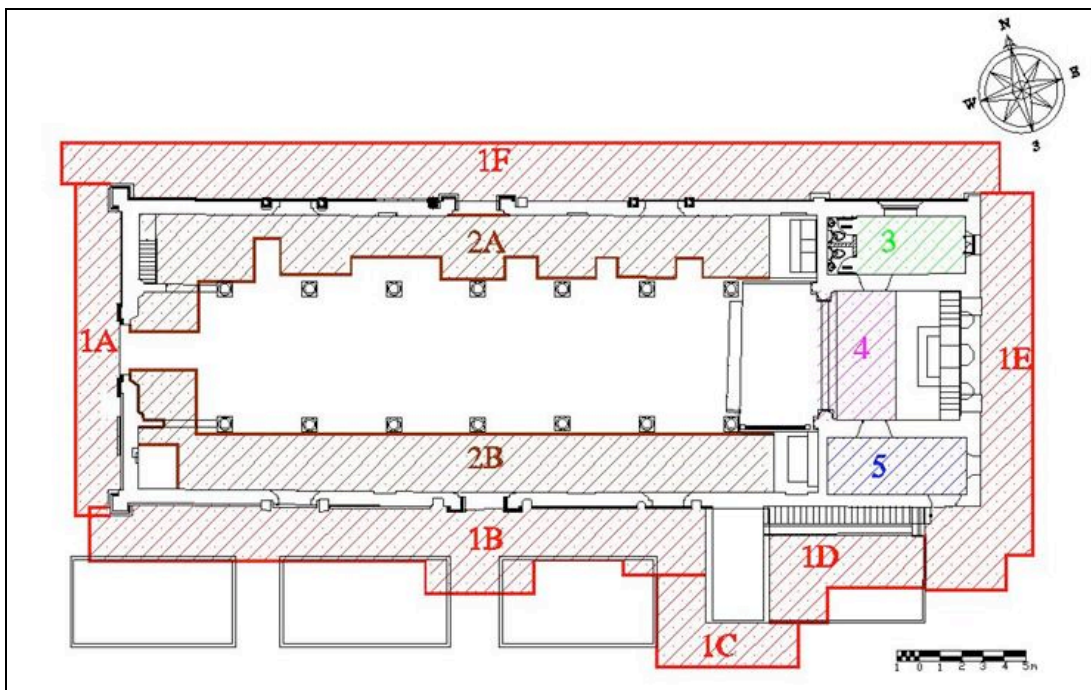


Figura 28. Disposición espacial de las áreas estudiadas.

4.2 Materiales y equipos

El instrumento GPR utilizado en el estudio es el modelo K2 del fabricante Ingegneria dei Sistemi (IDS), cuyas especificaciones son:

- Convertidor A/D de 16 bits
- Frecuencia de repetición de pulso hasta 400 Khz
- Tasa de muestreo: hasta 512 muestras/segundo
- Longitud máxima de registro: 9999 nseg
- Número de muestras por traza: 128-8129
- Numero de apilamientos: hasta 32768
- Promedio de transferencia de datos: 100 Mbit/s
- Número máximo de antenas: 8

Las antenas utilizadas son:

- RIS Monoestática blindada de 600 Mhz
- RIS Monoestática blindada de 1600 Mhz
- RIS Monoestática blindada de 200 Mhz

Durante la adquisición se utilizaron otros equipos y materiales como son:

- Computadora portátil
- Baterías recargables 12V
- Cintas métricas
- Tiza
- Marcadores
- Tirro

- Libreta de campo
- Software IDS K2 en la plataforma Windows 2000.

4.3 Mediciones en campo

Para la adquisición de datos se realiza primero un reconocimiento del área para definir los mallados, una vez establecido el lugar del mallado se toma un punto como origen y se miden las distancias desde el punto seleccionado y al menos dos puntos identificables en el plano, se toma como línea base la pared de la iglesia respecto a la cual las líneas longitudinales son paralelas y las líneas transversales son perpendiculares.



Figura 29. Colocación de marcas en la superficie para definir el mallado.

En la superficie del templo se realizan marcas cada 25 cm (figura 29) las cuales tienen como objetivo ser las guías por las cuales pasa la antena. Una vez realizadas las marcas de la malla se procede a la calibración instrumental y a adquirir los datos desplazando el arreglo de antenas seleccionado a velocidad constante sobre las marcas de los perfiles (figura 30), las secciones se visualizan en tiempo real en la pantalla del computador portátil y la información fue almacenada en la unidad de disco duro. Una vez

culminada una orientación se configura el radar y se adquieren los datos de la orientación restante. A medida que se realiza la adquisición se anotan los datos de los registros y las observaciones necesarias. Al finalizar la adquisición de mallas se repite el procedimiento utilizando otro arreglo de antena.

4.4 Controles de calidad

Durante la adquisición de cada línea el operador visualiza el radargrama en tiempo real verificando así la calidad de los datos y la distancia registrada en el ordenador, en caso que haberse detectado ruido que afecte de manera importante el radargrama o que la distancia de registro no coincida con la recorrida por la antena se repite la adquisición de la línea.

Al finalizar la adquisición de cada mallado se exportó la configuración espacial guardada en el registro para verificar que coincidiera con la geometría marcada en la superficie del levantamiento. En caso de haber errores con la configuración espacial puede ser necesario repetir la adquisición de la malla.



Figura 30. Adquisición de datos con GPR.

4.5 Procesamiento

Debido al uso de un arreglo multicanal con las antenas de 600 Mhz y 1600Mhz se obtuvieron tres tipos de registros, se indica la antena emisora (Tx) y la receptora (Rx) de cada uno. El arreglo con la antena de 200 Mhz, al ser monoestático, muestra un solo tipo de registro. A cada tipo de registro se le realizaron diversas pruebas de procesamiento y la secuencia de cada uno se muestra a continuación:

Perfiles 600 Mhz (Tx: 600 Mhz; Rx: 600 Mhz)

- Corrección de tiempo inicial
- Background Removal
- Filtro pasa-banda (corte bajo 300 Mhz, corte alto 1100 Mhz)
- Ganancia Lineal

Perfiles 1600 Mhz (Tx: 1600 Mhz; Rx: 1600 Mhz)

- Corrección de tiempo inicial
- Background Removal
- Filtro pasa-banda (corte bajo 1200 Mhz, corte alto 2300 Mhz)
- Ganancia Lineal / Ganancia exponencial

Perfiles 600-1600 Mhz (Tx: 600 Mhz; Rx: 1600 Mhz)

- Corrección de tiempo inicial
- Background Removal
- Filtro pasa-banda (corte bajo 300 Mhz, corte alto 2100 Mhz)

- Ganancia Lineal

Perfiles 200 Mhz (Tx: 200 Mhz; Rx: 200 Mhz)

- Corrección de tiempo inicial
- Background Removal
- Filtro pasa-banda (corte bajo 100 Mhz, corte alto 800 Mhz)
- Ganancia Lineal

La velocidad de las ondas electromagnéticas en el medio se determinó en los radargramas mediante el ajuste de hipérbolas de reflexión sintéticas, la velocidad seleccionada para realizar la conversión tiempo-profundidad fue de 100×10^6 m/s, lo que equivale a 0,1 m/ns.

Luego del procesamiento de datos las visualizaciones pueden realizarse de tres (3) formas distintas, los radargramas en 2D de cada malla, los radargramas en 3D de un mallado e imágenes tomográficas en planta de los radargramas (figura 31).

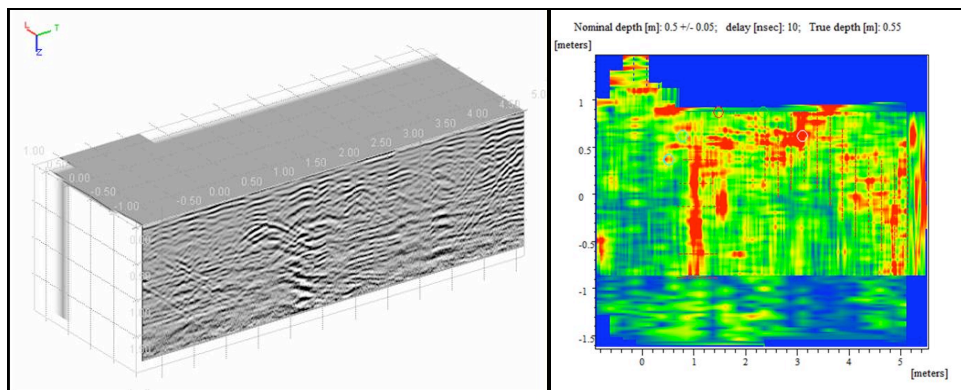


Figura 31. Visualización 3D de radargramas (izquierda) e imagen tomográfica (derecha).

4.6 Interpretación

En la interpretación de radargramas fue necesario establecer criterios de discriminación de anomalías, con la finalidad de caracterizar y clasificar los diferentes comportamientos anómalos de todo el estudio. Cada categoría establecida se basa en las características de la anomalía que se presenta en los perfiles. La clasificación se presenta y define brevemente a continuación:

4.6.1 Terreno Perturbado

Se asocia a heterogeneidades en el medio producto de materiales de relleno o diferencias de compactación con el entorno, puede haber dispersión y distorsión de la señal y se modifica la geometría de los reflectores en el radargrama (figura 32).

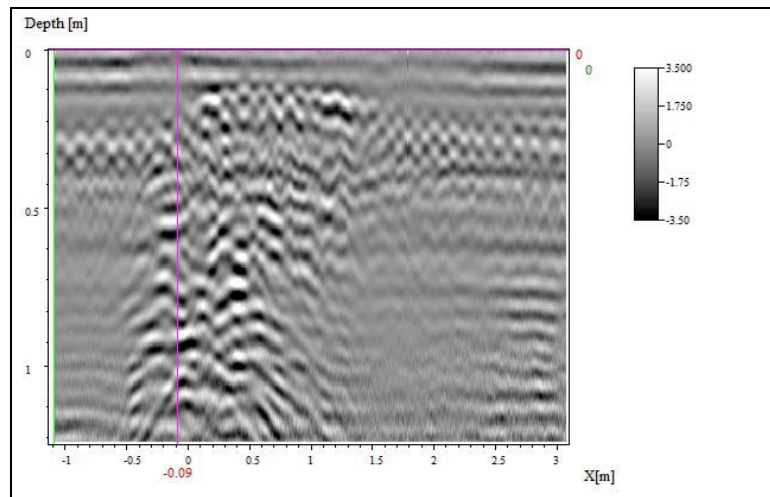


Figura 32. Radargrama en que se visualiza una anomalía de terreno perturbado.

4.6.2 Elemento Estructural

Posibles estructuras visualizadas con hipérbolas de reflexión, que pueden no ser simétricas, y un marcado contraste de amplitud (figura 33).

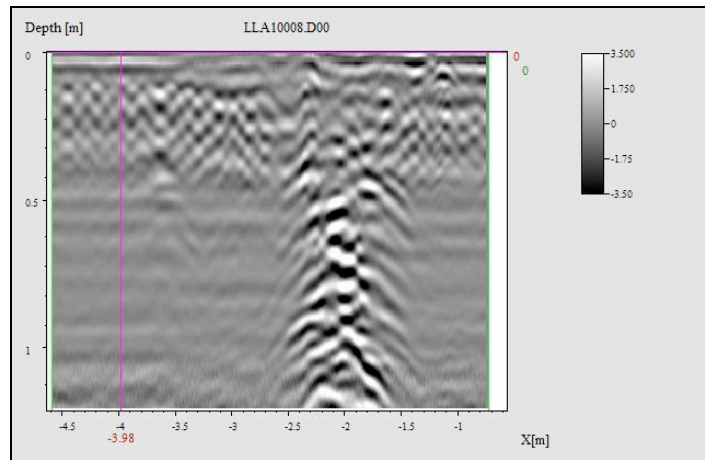


Figura 33. Radargrama en que se visualiza una anomalía asociada a un elemento estructural.

4.6.3 Tubería

Para la detección de tuberías y utilidades se realiza una correlación de hipérbolas de reflexión en diversos radargramas adyacentes que definan un rumbo en común (figura 34).

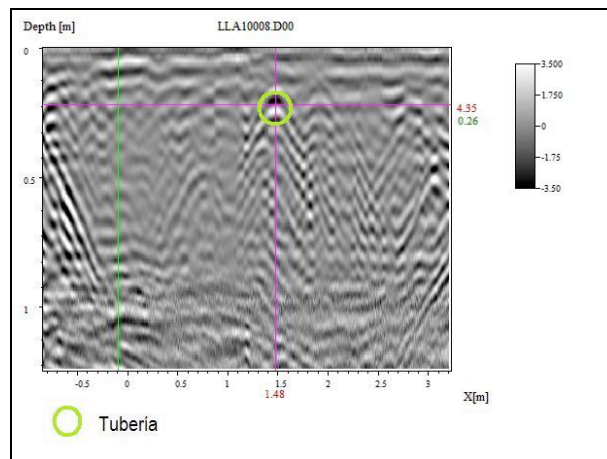


Figura 34. Radargrama en que se visualiza una anomalía asociada a una tubería.

4.6.4 Fundación o zapata

Anomalías encontradas en los bordes de radargramas correspondientes a columnas o paredes y se visualizan con geometrías hiperbólicas (figura 35).

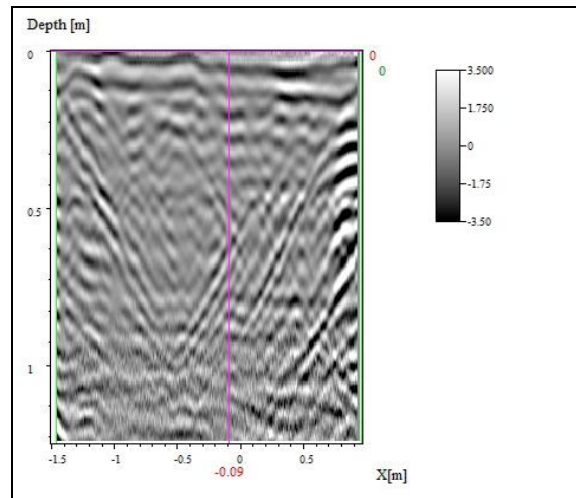


Figura 35. Radargrama en que se visualiza una anomalía asociada a una zapata.

4.6.5 Cavidad

Asociadas a presencia de aire debido al alto contraste de impedancia que introduce un patrón de ruido a lo largo de todo el eje del tiempo en el radargrama (figura 36).

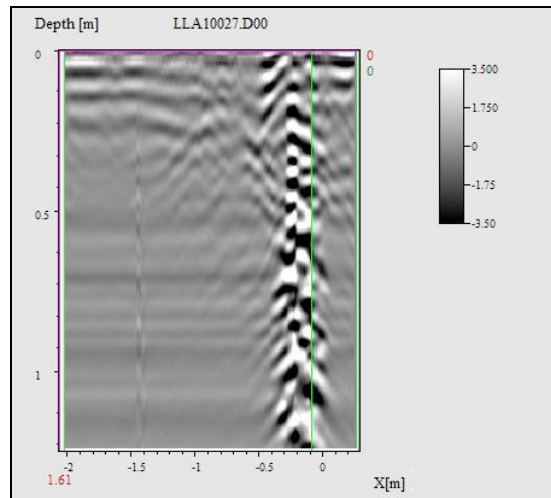


Figura 36. Radargrama en que se visualiza una anomalía de aire asociada a una cavidad.

4.6.6 Anomalías Puntuales:

Anomalías de diversos tipos que no presentan continuidad espacial respecto los radargramas adyacentes, pueden visualizarse en un radargrama similar a una tubería.

4.6.7 Placa de Concreto:

- **Con malla metálica:** se define en los lugares del templo con piso de concreto o terracota que presentan secuencias de hipérbolas de reflexión asociables a una estructura metálica (figura 37).

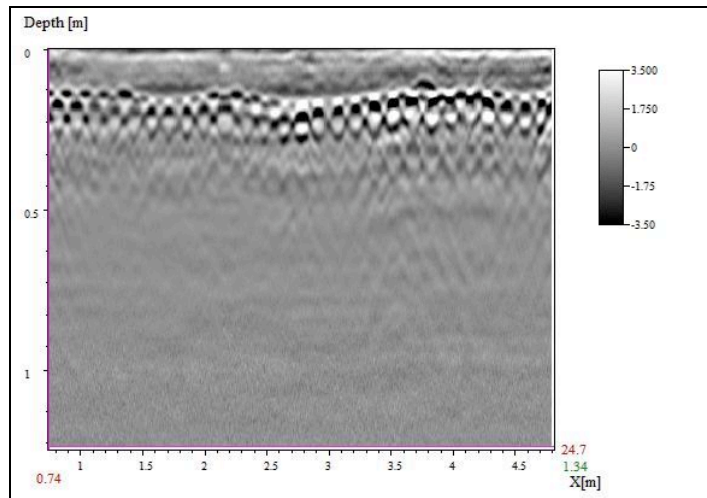


Figura 37. Radargrama en que se visualiza un piso de terracota con malla metálica.

- **Sin malla:** se interpretan en los lugares que tienen piso de concreto pero que en los radargramas no muestran anomalía asociada a la malla de acero (figura 38).

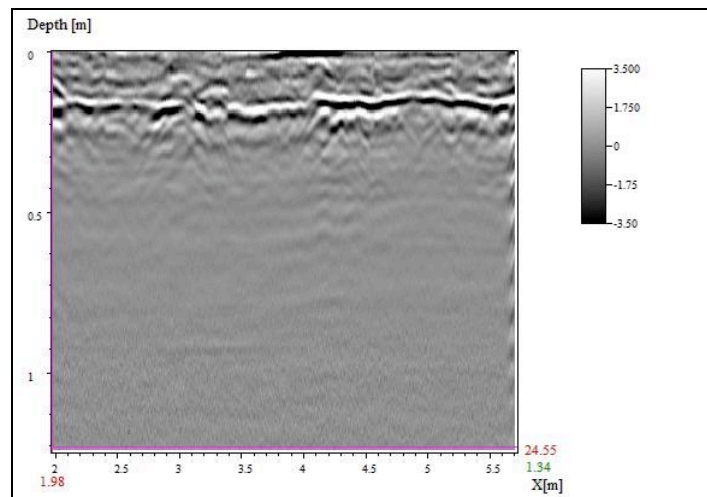


Figura 38. Radargrama en que se visualiza un piso de concreto sin malla metálica.

CAPÍTULO V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación se presentan los mapas para toda el área en estudio de los perfiles adquiridos y de las anomalías interpretadas. En la figura 39 se muestra la ubicación de líneas adquiridas para el arreglo de antenas 600-1600 Mhz.

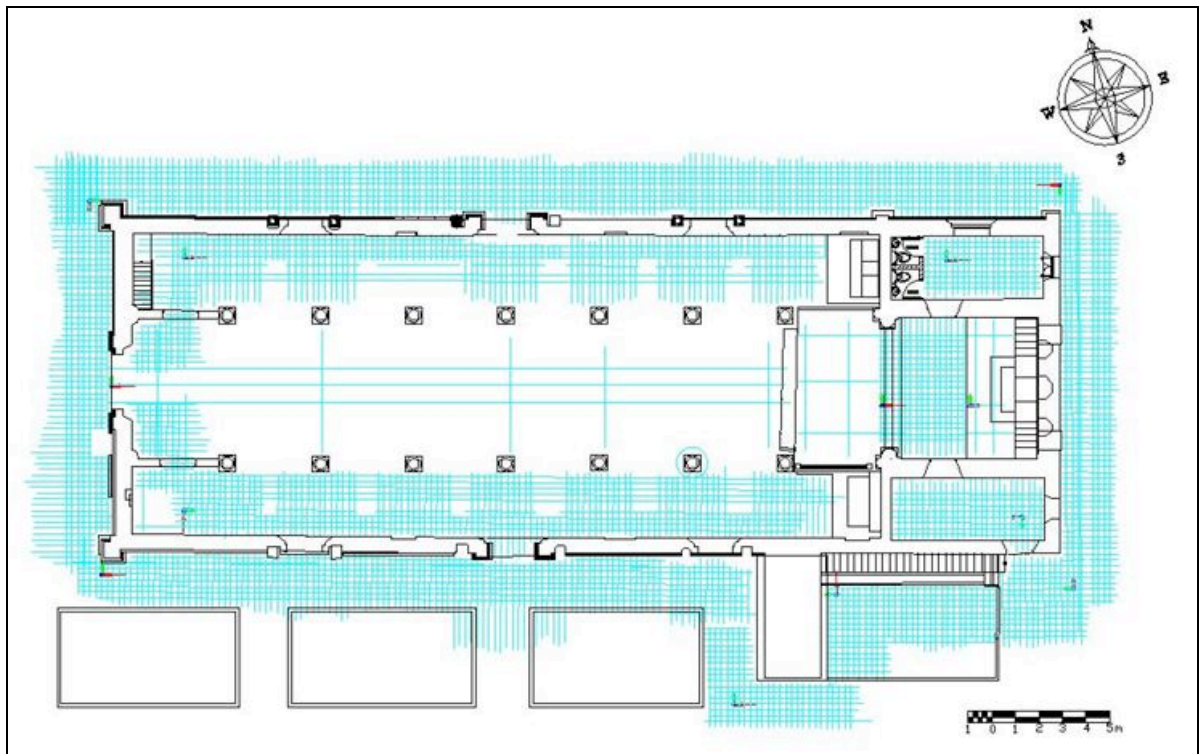


Figura 39. Mapa de ubicación de líneas adquiridas.

La adquisición cubre la totalidad del perímetro exterior del templo hasta los dos (2) metros, en el interior se observa como el área de las naves norte y sur son cubiertas con excepción de los lugares inaccesibles por el apuntalamiento temporal del templo (figura 26) y la zona de la pila bautismal. El área del altar principal fue levantada a detalle sólo en la zona este y el área de los cuartos norte y sur fueron adquiridos en toda su extensión. La

división de los mallados respecto a la clasificación por áreas del templo se muestra en la figura 40.

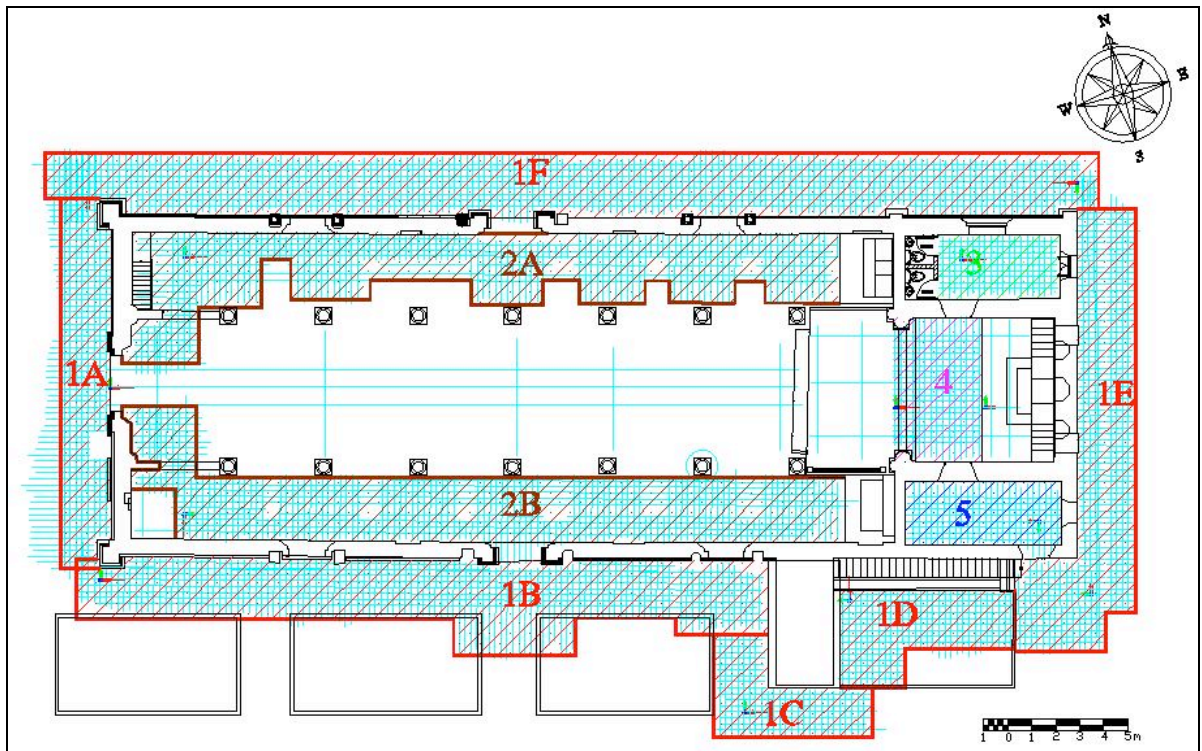


Figura 40. Mapa de ubicación de líneas adquiridas respecto a la división por áreas.

La mayor parte del templo posee un piso de concreto, en la mayoría de las áreas estudiadas se detecta un mallado metálico característico con excepción de una parte del altar, ambos cuartos y a poca distancia de los muros de las naves norte y sur en el interior, y en las áreas externas al sur de la torre y la parte este donde se inicia la calle. Las zonas donde el piso actual es de tierra son segmentos intervenidos previamente como lo son la parte norte y sur del exterior y en el interior una zona de la nave norte.

En la figura 41 se ubican los diversos pisos actuales en la planta de la iglesia, el detalle de espesor de concreto y profundidad de la malla de acero se especifica en cada área.

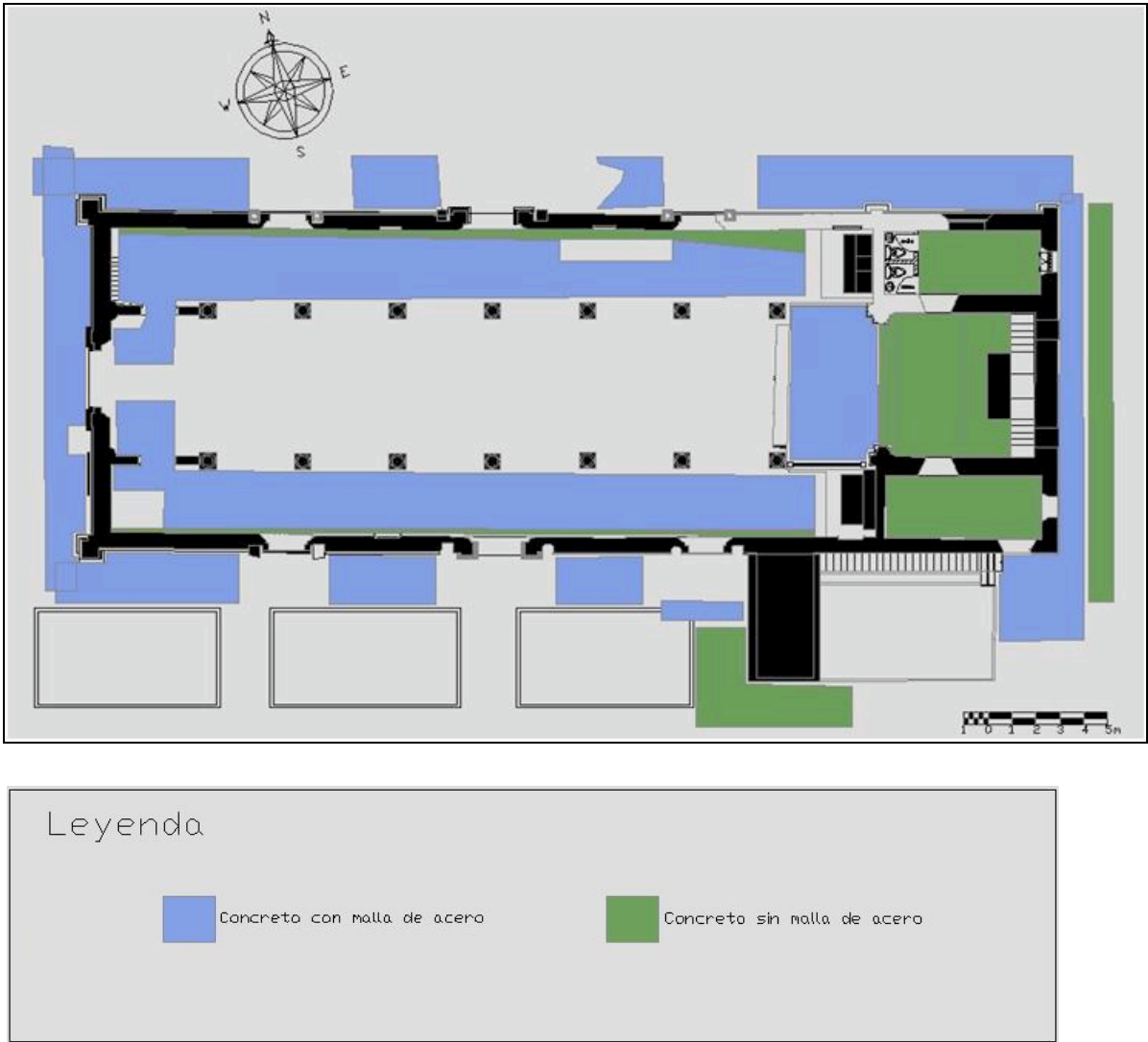


Figura 41. Ubicación de diferentes pisos de la Iglesia.

El mapa general de anomalías (figura 42) muestra la ubicación de todos los posibles lugares de interés en el interior y exterior del templo referenciados a la planta actual de la iglesia. Seguido se realiza una división por áreas definidas previamente.



Figura 42. Ubicación de anomalías en el templo.

5.1 Áreas Externas

5.1.1 Área 1A. Oeste de la iglesia, entrada principal

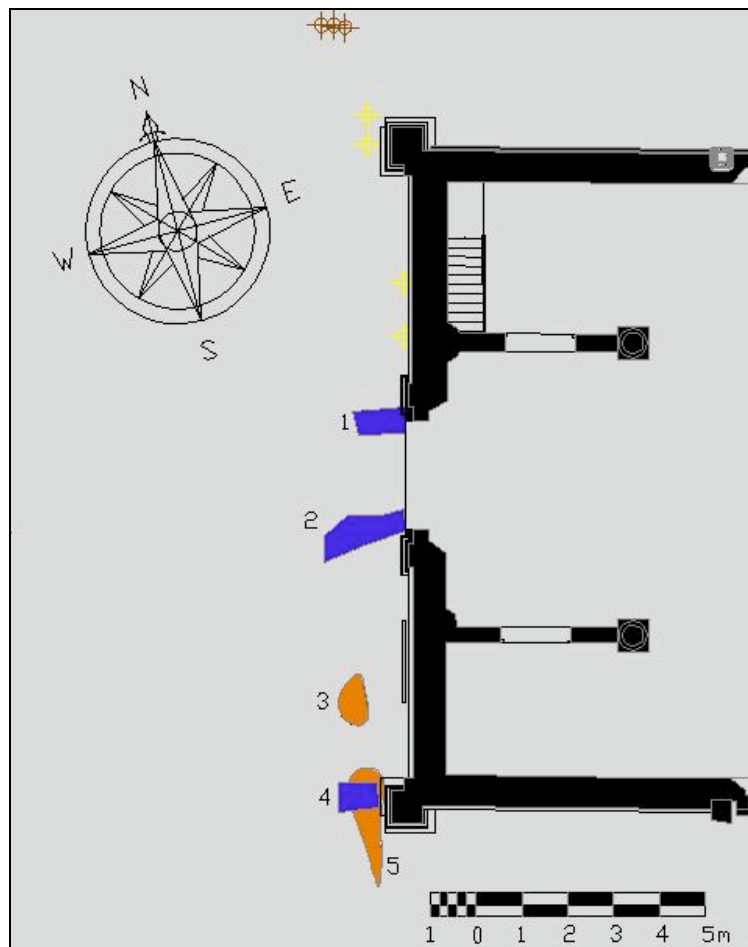


Figura 43. Anomalías de la zona oeste de la iglesia (área 1A).

El espesor de concreto varía entre 17 y 22 cm con la presencia de malla metálica en toda el área.

Tabla 2. Clasificación de anomalías de la zona oeste de la iglesia (área 1A).

Nro. Anomalía	Profundidad (m)	Tipo Anomalía
1	0,40 - 0,95	Elemento estructural
2	0,40 - 0,90	Elemento estructural
3	0,35 - 1, 05	Terreno perturbado
4	0,28 - 0,61	Elemento estructural
5	0,35 - 1,14	Terreno perturbado

Las anomalías en la fachada principal de la iglesia (figura 43) pueden estar relacionadas a antiguos elementos estructurales del templo eliminados en intervenciones anteriores. Según lo señalado por el autor J. Churión en 1857, para la construcción de edificaciones sobre suelo arcilloso es necesario realizar una excavación para colocar las fundaciones a suficiente profundidad con la finalidad de dar estabilidad a la estructura, lo que puede relacionarse a las anomalías de terrenos perturbados cercanas a los muros y columnas del templo.

Las anomalías 1 y 2 se ubican en los costados de la puerta principal y no se cuenta con información histórica de intervenciones que indiquen modificaciones; sin embargo, es posible que sean restos de estructuras ornamentales en la entrada del templo (G.Vertullo, comunicación personal, 2009). En el caso del área donde se presentan las anomalías 4 y 5, en el cual, según Villarroel (2003), la intervención del año 1979 se eliminaron unas “falsas columnas” que cubrían las originales. En la figura 44 se muestra la

fachada antigua en contraste con la moderna donde se observa la modificación antes mencionada.



Figura 44. Izquierda: fachada de la Iglesia en 1979 (tomado de Villarroel, 2003). Derecha: fachada del templo en 2009.

5.1.2 Área 1B. Sur de la iglesia

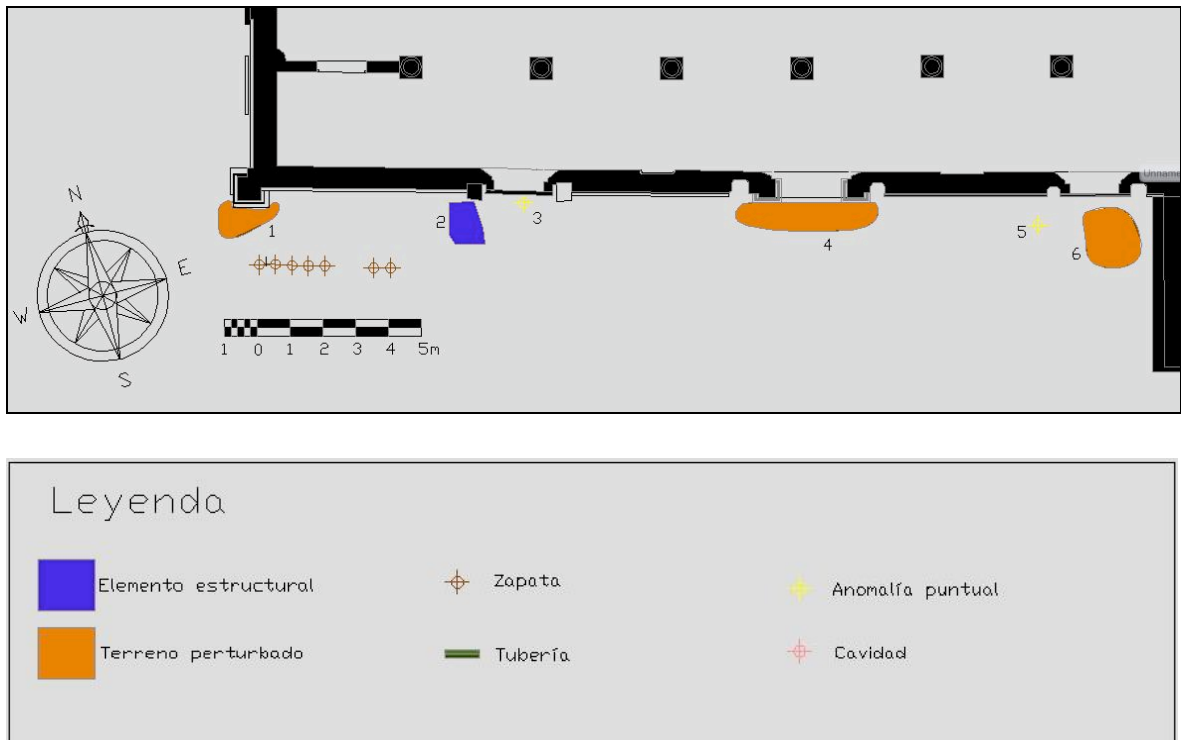


Figura 45. Anomalías de la zona sur de la iglesia (área 1B).

El espesor de concreto varía de 17-24 cm con la presencia de malla a excepción de los lugares intervenidos.

Tabla 3. Clasificación de anomalías de la zona sur de la iglesia (área 1B).

Nro. Anomalía	Profundidad (m)	Tipo Anomalía
1	0,40 - 1,20	Terreno perturbado
2	0,40 - 0,80	Elemento estructural
3	0,2	Anomalía puntual
4	0,24 - 0,90	Terreno perturbado
5	0,36	Anomalía puntual
6	0,19 - 0,87	Terreno perturbado

En la zona sur exterior del templo (figura 45) se observa la continuación de lo que pudo haber sido el trabajo de demolición de la columna falsa en 1979 (anomalía 1) la cual se muestra en la figura 46.

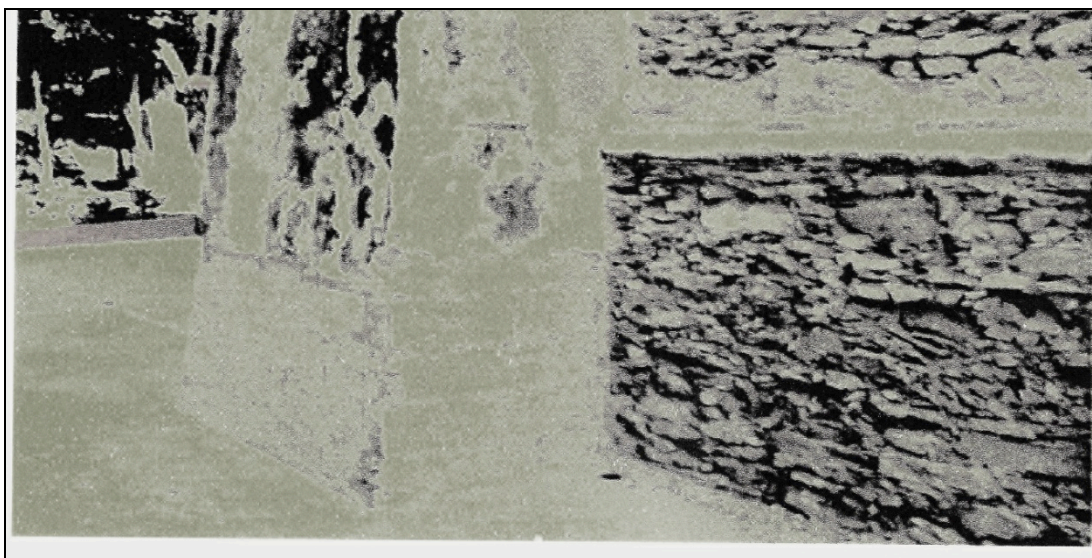


Figura 46. Detalle de la falsa columna demolida vista desde la parte sur del templo (tomada de Villarroel, 2003).

Las anomalías 4 y 6 se encuentran en las zonas intervenidas en el año 2006, específicamente en la puerta lateral, lugar donde se encontró un enterramiento directo (figura 47) y en la base oeste de la torre, lugar donde se realizó otra excavación (figura 48).



Figura 47. Enterramiento directo encontrado en puerta lateral (tomada de Vertullo, 2006).



Figura 48. Excavación en la base de la torre (Fotografía de Vertullo G.).

5.1.3 Área 1C. Sur de la Torre

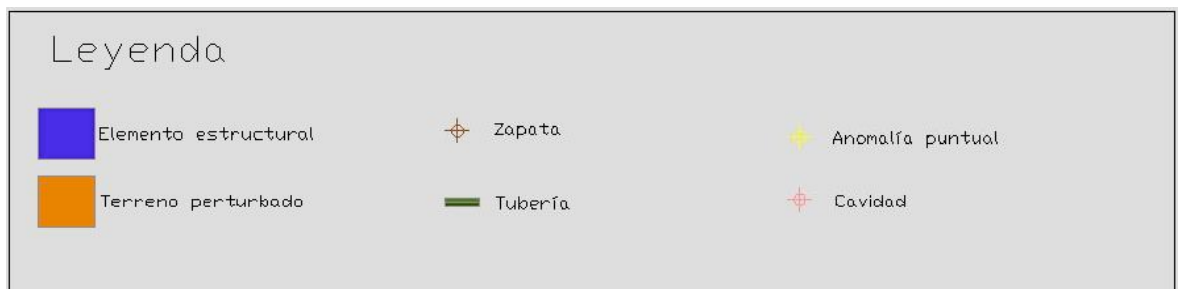
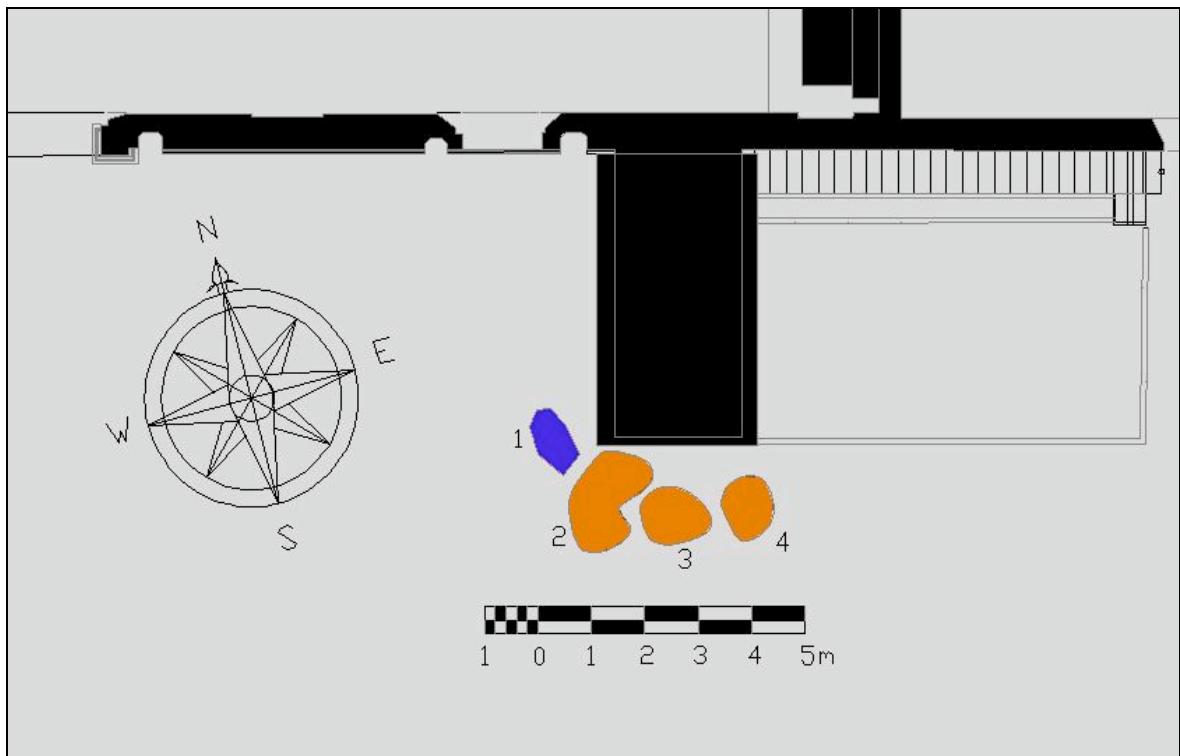


Figura 49. Anomalías al sur de la Torre (área 1C).

El espesor de concreto varía entre 20 y 26 cm sin la presencia de la malla metálica.

Tabla 4. Clasificación de anomalías al sur de la Torre (área 1C).

Nro. Anomalía	Profundidad (m)	Tipo Anomalía
1	0,31 - 0,79	Elemento estructural
2	0,13 - 0,90	Terreno perturbado
3	0,15 - 0,92	Terreno perturbado
4	0,15 - 0,93	Terreno perturbado

En el área sur y sureste de la torre se observan cuatro anomalías (figura 49), las tres clasificadas como anomalías de terreno perturbado no pueden ser definidas geoméricamente en su totalidad ya que los perfiles no tienen la longitud necesaria debido a la presencia de una barrera en el momento de la adquisición.

5.1.4 Área 1D. Jardín al este de la Torre



Figura 50. Anomalías en el jardín al este de la Torre (área 1D).

El espesor del relleno varía entre 20 y 24 cm.

Tabla 5. Clasificación de anomalías en el jardín al este de la Torre (área 1D).

Nro. Anomalía	Profundidad (m)	Tipo Anomalía
1	0,33 - 0,70	Terreno perturbado
2	0,27 - 0,78	Terreno perturbado
3	0,23 - 0,50	Terreno perturbado
4	0,28	Cavidad
5	0,35 - 0,71	Elemento estructural
6	0,27	Tubería
7	0,41	Tubería

En la zona del jardín al este de la torre se observan tres anomalías de terreno perturbado (figura 50), en dicha zona el antropólogo Román (2004) realizó una excavación de 70 cm de profundidad en la búsqueda de restos humanos como evidencia de la existencia de un cementerio; sin embargo, no se encontraron restos algunos.

Se observan dos anomalías asociadas a tuberías enterradas; sin embargo, no es posible identificar la continuidad de la tubería correspondiente a la anomalía 7 debido a la configuración del mallado en el área.

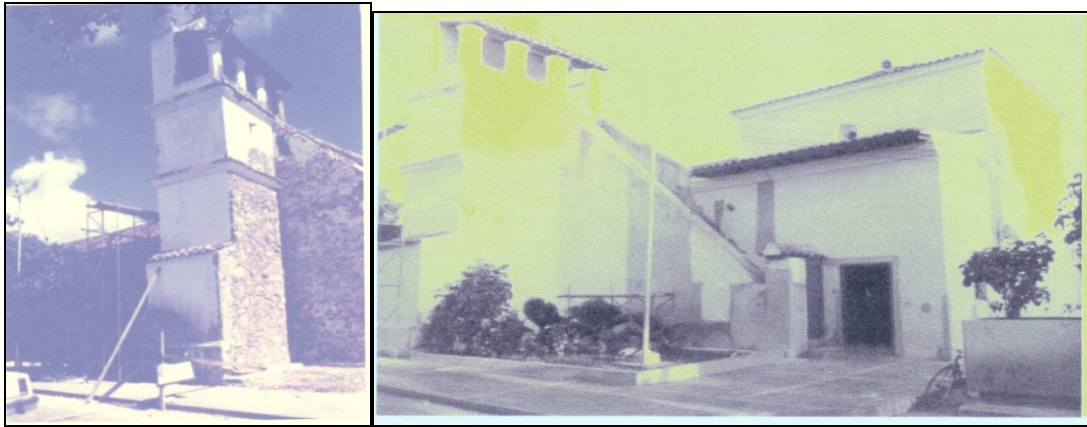


Figura 51. Izquierda: jardín en 1979. Derecha: jardín 1984 (tomado de Villarroel, 2003).

En la figura 51 se muestra la construcción del jardín en el año 1979 y una vez culminado con vegetación en el año 1984. Es posible que el origen de la anomalía caracterizada como elemento estructural sea más antiguo que la construcción del jardín. En la figura 52 se muestra la situación actual.



Figura 52. Jardín al este de la torre en 2009.

5.1.5 Área 1E. Este de la Iglesia

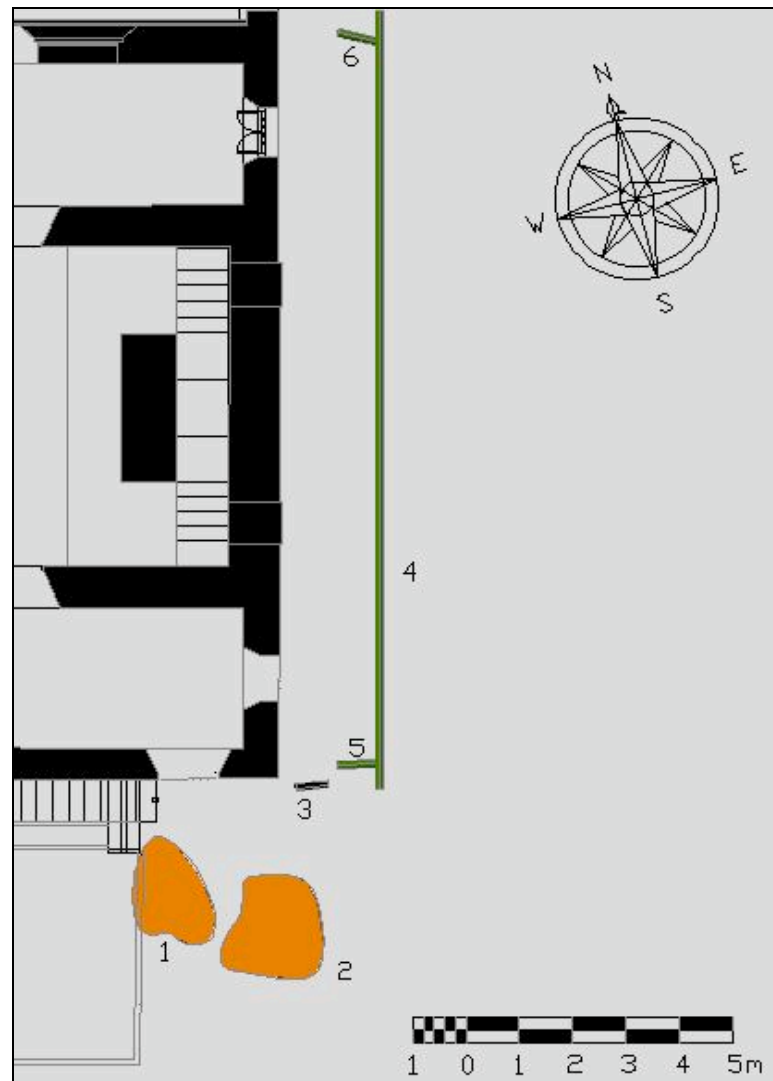


Figura 53. Anomalías en la zona este de la iglesia (área 1E).

Espesor de concreto varía entre 13 y 21 cm al este del jardín y hasta 28 cm en la parte trasera del templo sobre el brocal con la existencia de malla metálica. En la zona del nivel de la calle el espesor varía entre 19 y 23 cm sin malla metálica.

Tabla 6. Clasificación de anomalías en la zona este de la iglesia (área 1E).

Nro. Anomalía	Profundidad (m)	Tipo Anomalía
1	0,21 - 0,74	Terreno perturbado
2	0,34 - 0,79	Terreno perturbado
3	0,15	Tubería
4	0,36	Tubería
5	0,44	Tubería
6	0,5	Tubería

En la zona este del exterior del templo se observan anomalías relacionadas con tuberías (figura 53), una de ellas con orientación aproximada norte-sur, no se puede determinar si continúa hacia los jardines ubicados al norte del templo debido a los límites del levantamiento.

Las anomalías observadas en la parte sur, cercanas al jardín pueden estar relacionadas a la construcción del templo, en la figura 54 se observa una técnica tradicional de construcción en la cual se excavan agujeros dentro de los cuales se realiza la mezcla utilizada para los muros y una vez

culminada la construcción se tapan los mismos (L.Vierma, comunicación personal, 2009).



Figura 54. Apertura de agujeros destinados a la construcción (fotografía de Piñero V., 2007).

5.1.6 Área 1F. Norte de la Iglesia

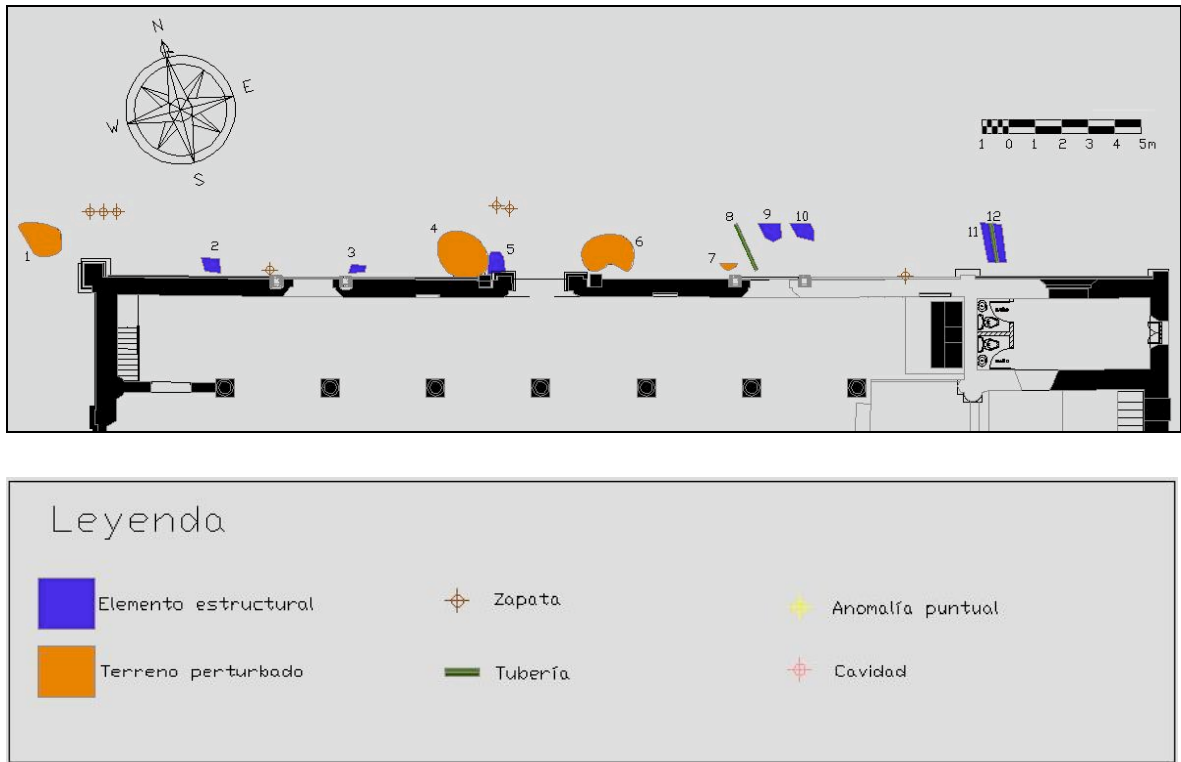


Figura 55. Anomalías en la zona norte de la iglesia (área 1F).

Espesor de concreto varía entre 20 y 26 cm con la presencia de malla metálica a excepción de las zonas intervenidas.

Tabla 7. Clasificación de anomalías en la zona norte de la iglesia (área 1F).

Nro. Anomalía	Profundidad (m)	Tipo Anomalía
1	0,32 - 0,98	Terreno perturbado
2	0,32 - 0,69	Elemento estructural
3	0,26 - 0,63	Elemento estructural
4	0,32 - 0,96	Terreno perturbado
5	0,30 - 0,87	Elemento estructural
6	0,24 - 0,83	Terreno perturbado
7	0,25 - 0,80	Terreno perturbado
8	0,28	Tubería
9	0,33 - 0,69	Elemento estructural
10	0,36 - 0,78	Elemento estructural
11	0,40 - 0,70	Elemento estructural
12	0,27	Tubería

La anomalía observada al noroeste del templo en la figura 55 (anomalía 1) puede estar relacionada a la perturbación del terreno causada

por la demolición del pavimento como se muestra en la figura 56 de la intervención del año 1979.

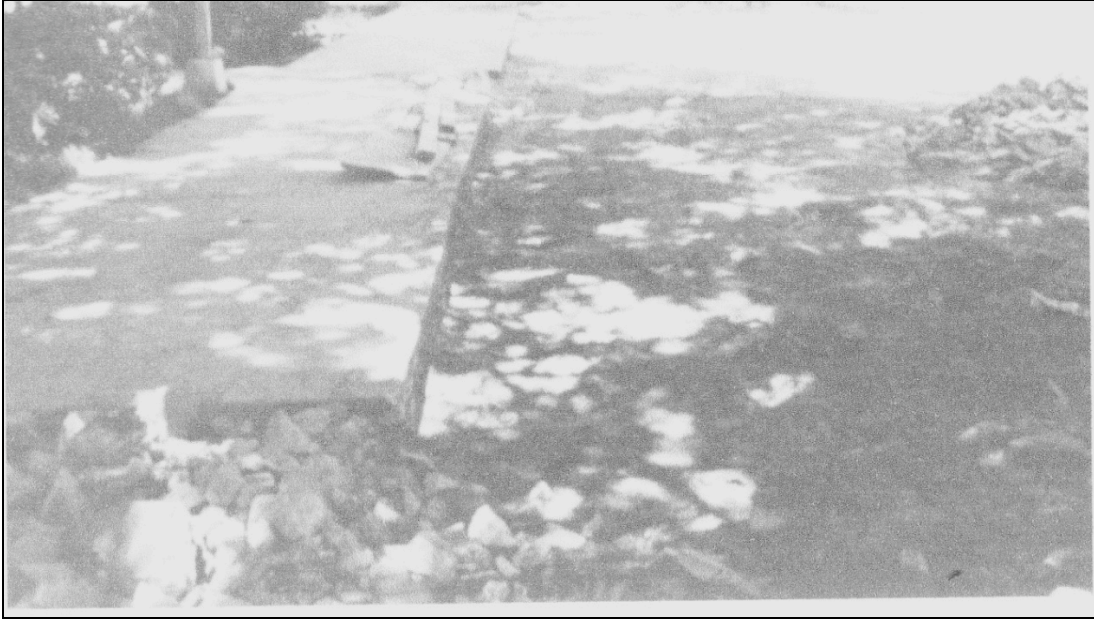


Figura 56. Demolición de pavimento noroeste (tomado de Villarroel, 2003).

Las anomalías encontradas a los lados de la puerta lateral se definen como terrenos perturbados, según Román (2004) se encontraron restos humanos a 65 cm, pertenecientes a un cementerio antiguo en un jardín ubicado diagonalmente al norte de la puerta lateral norte, dicho jardín es el límite norte del levantamiento por lo cual no se descarta la posibilidad de enterramientos.

Se observan dos tuberías transversales al muro del templo; sin embargo, no se puede determinar la continuidad hacia el norte debido a los límites del levantamiento.

5.2 Áreas Internas

5.2.1 Área 2A. Parte interior norte



Figura 57. Anomalías en la zona norte del interior de la iglesia (área 2A).

Espesor de concreto entre 16 y 24 cm con presencia de malla metálica, concreto sin malla cercano al muro del templo con espesor de 27 cm.

Tabla 8. Clasificación de anomalías en la zona norte del interior de la iglesia (área 2A).

Nro. Anomalía	Profundidad (m)	Tipo Anomalía
1	0,30 - 0,82	Terreno perturbado
2	0,23 - 0,68	Terreno perturbado
3	0,79 - 1,11	Elemento estructural
4	0,32 - 0,76	Elemento estructural
5	0,79 - 1,05	Terreno perturbado
6	0,33	Tubería
7	0,22 - 0,51	Elemento estructural
8	0,48 - 1,14	Terreno perturbado
9	0,25 - 0,48	Elemento estructural
10	0,51 - 0,84	Elemento estructural
11	0,13 - 0,95	Terreno perturbado
12	0,52 - 0,88	Elemento estructural
13	0,40 - 0,65	Elemento estructural
14	0,32 - 1,00	Terreno perturbado
15	0,47 - 0,80	Elemento estructural
16	0,23 - 1,09	Terreno perturbado
17	0,27 - 0,59	Elemento estructural

En el área interior norte se observan numerosas anomalías (figura 57), toda esta zona ha sido sometida a intervenciones según los registros históricos, como se muestra en la figura 58, en la cual durante la modificación del piso se removieron losas sepulcrales, evidencia de enterramientos en el lugar.

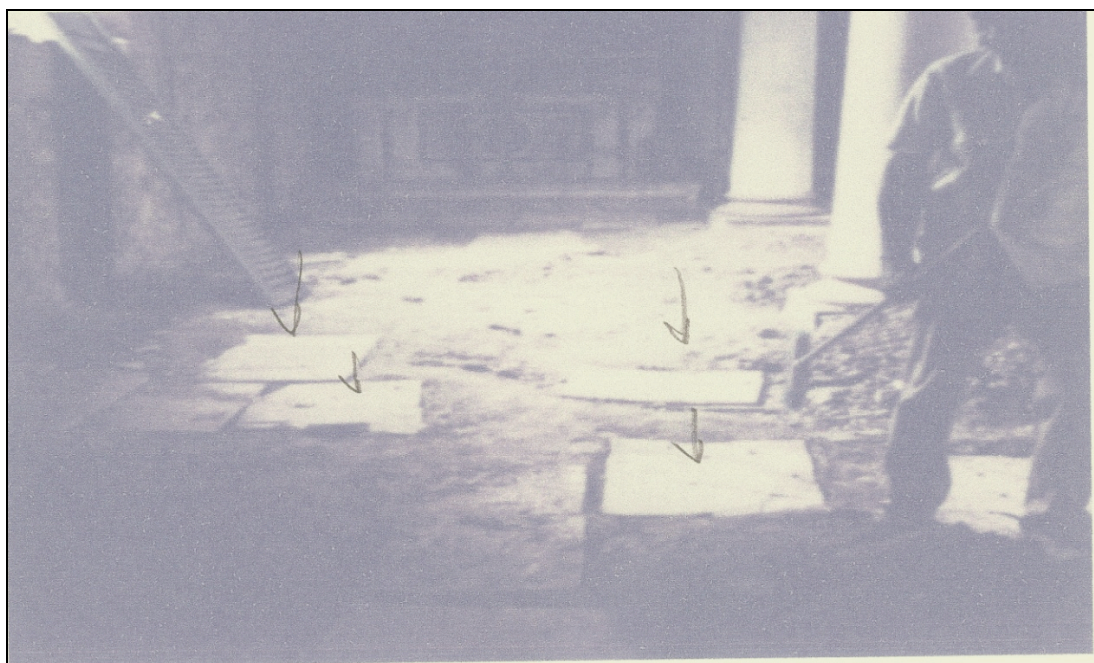


Figura 58. Modificación del piso de la nave norte con la presencia de losas sepulcrales (tomado de Villarroel, 2003).

En la zona oeste de la nave, debajo de la puerta de acceso se observan dos anomalías, un elemento estructural a una profundidad mayor asociado con la estructura del arco y terreno perturbado por encima como se muestra en la figura 59.

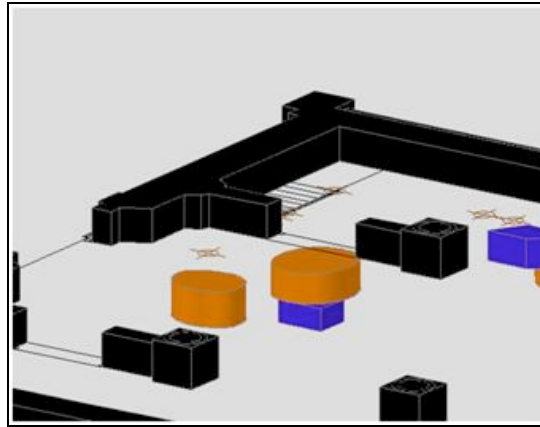


Figura 59. Anomalías ubicadas en la puerta de acceso interno a la nave norte.

La anomalía 11 está asociada a una fosa la cual contiene restos humanos en osarios, la anomalía 14 ubicada al este posee un comportamiento similar por lo que puede existir una fosa vecina de menor tamaño. Por las dimensiones y profundidad que presenta la anomalía 16 existe la probabilidad de que sea producto de uno de los enterramientos mencionados históricamente en la zona.

Se observan elementos estructurales a los lados de la fosa (anomalías 10 y 11) que pueden estar asociadas a elementos de soporte para evitar el colapso de la misma; sin embargo, no se logra definir la continuidad hacia la nave central debido a falta de datos en las zonas de apuntalamiento del templo. El mismo caso se da para anomalía 9 y el elemento estructural 7, el cual tiene un comportamiento similar a tres anomalías observadas en la nave sur del templo asociadas a estructuras antiguas actualmente inexistentes.

Se observa una anomalía asociada a una tubería enterrada, la cual no tiene continuidad en la parte exterior del templo y no se puede definir la extensión hacia el interior y la nave central con base a la extensión de los perfiles.

5.2.2 Área 2B. Parte interior sur

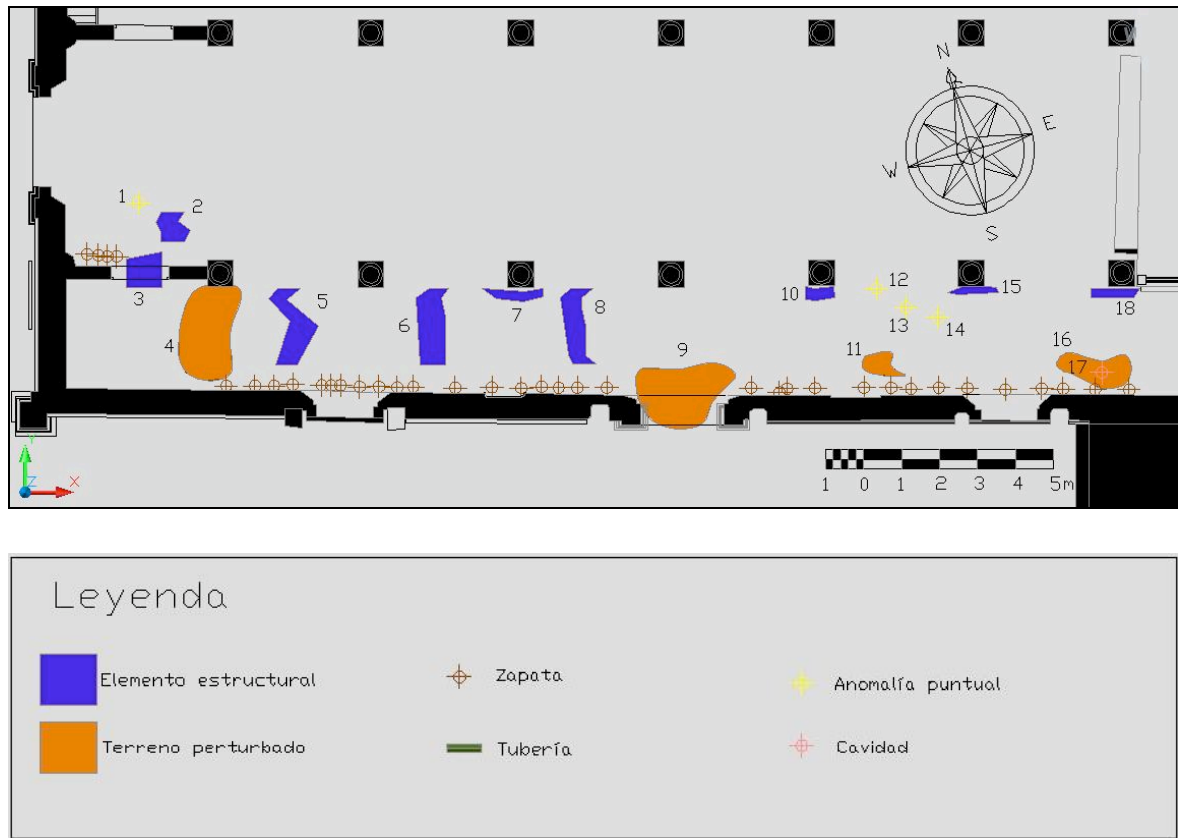


Figura 60. Anomalías en la zona norte del interior de la iglesia (área 2B).

Espesor de concreto variable entre 15 y 24 cm con la existencia de malla metálica, cercano al muro del templo se encuentra concreto sin malla de espesor 30 cm.

Tabla 9. Clasificación de anomalías en la zona norte del interior de la iglesia (área 2B).

Nro. Anomalía	Profundidad (m)	Tipo Anomalía
1	0,33	Anomalía puntual
2	0,33 - 0,89	Elemento estructural
3	0,33 - 1,12	Elemento estructural
4	0,30 - 1,08	Terreno perturbado
5	0,18 - 0,57	Elemento estructural
6	0,14 - 0,53	Elemento estructural
7	0,10 - 0,47	Elemento estructural
8	0,15 - 0,50	Elemento estructural
9	0,22 - 0,82	Terreno perturbado
10	0,06 - 0,43	Elemento estructural
11	0,30 - 0,87	Terreno perturbado
12	0,19	Anomalía puntual
13	0,2	Anomalía puntual
14	0,2	Anomalía puntual
15	0,14 - 0,44	Elemento estructural
16	0,33 - 0,83	Terreno perturbado
17	0,1	Cavidad
18	0,15 - 0,39	Elemento estructural

Al inicio de la nave central (figura 60) se observa parcialmente un posible elemento estructural que no puede ser definido ya que no hay extensión del mallado hacia el este del templo donde posiblemente tiene continuidad el evento.

Debajo de la puerta de acceso interno de la nave sur se observa la anomalía 3, asociada a un elemento estructural del arco similar a la observada en la nave norte. La anomalía 4 corresponde a terreno perturbado, por las dimensiones y profundidad puede ser posiblemente ocasionada por un enterramiento directo.

Se observan tres anomalías alargadas con orientación aproximada norte-sur (anomalías 5, 6 y 8) las cuales se asocian con elementos estructurales antiguos del templo, pudiendo ser los restos de paredes de capillas que fueron demolidas en la ampliación de la iglesia (M. Herrera, comunicación personal, 2009), el límite sur puede ser definido en los radargramas adquiridos; sin embargo, no se logra definir la continuidad hacia el norte en la nave central del templo.

La anomalía 9 ubicada en la puerta lateral del templo tiene continuación hacia el exterior del templo, ésta zona fue perturbada durante la intervención del año 2006 para la colocación de la estructura mostrada en la figura 61, la cual posteriormente fue demolida.



Figura 61. Excavación en la entrada lateral del templo (Fotografía de Vertullo G.).

Las anomalías 7, 10 ,15 y 18 que se observan en las bases de las columnas se relacionan a las fundaciones de las mismas. En el sector este de la nave al norte de la torre se observa una anomalía de terreno perturbado con un comportamiento puntual que se asocia a una posible cavidad en el terreno.

5.2.3 Área 3. Cuarto Norte

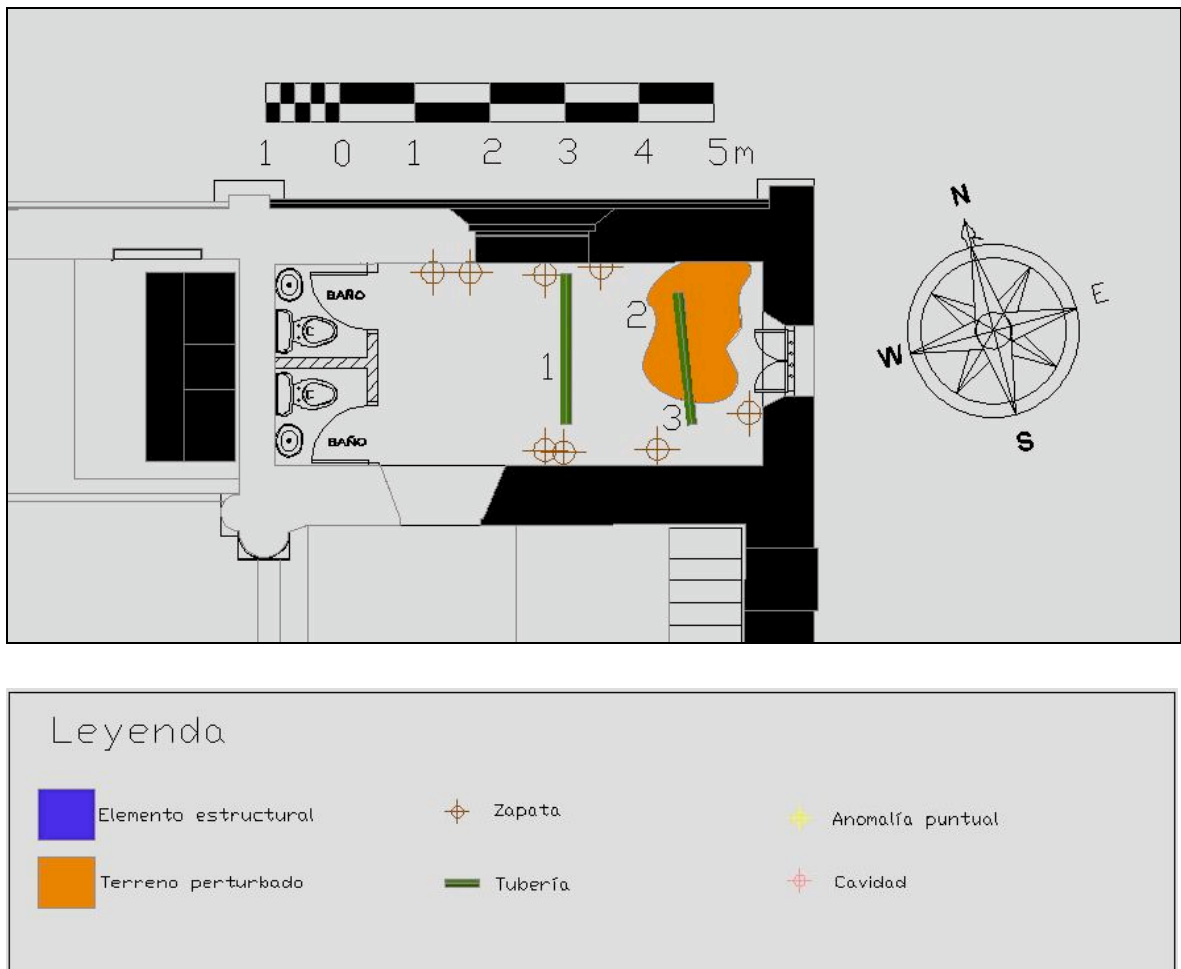


Figura 62. Anomalías en cuarto norte (área 3).

Espesor de concreto entre 20 y 24 cm sin la existencia de malla metálica.

Tabla 10. Clasificación de anomalías en cuarto norte (área 3).

Nro. Anomalía	Profundidad (m)	Tipo Anomalía
1	0,24	Tubería
2	0,40 - 0,94	Terreno perturbado
3	0,45	Tubería

En el cuarto norte (figura 62) se observan dos anomalías asociadas a tuberías con orientación norte-sur, no se observa continuidad hacia el norte en el exterior del templo. La anomalía de terreno perturbado puede estar asociada a la colocación de la tubería.

5.2.4 Área 4. Altar principal

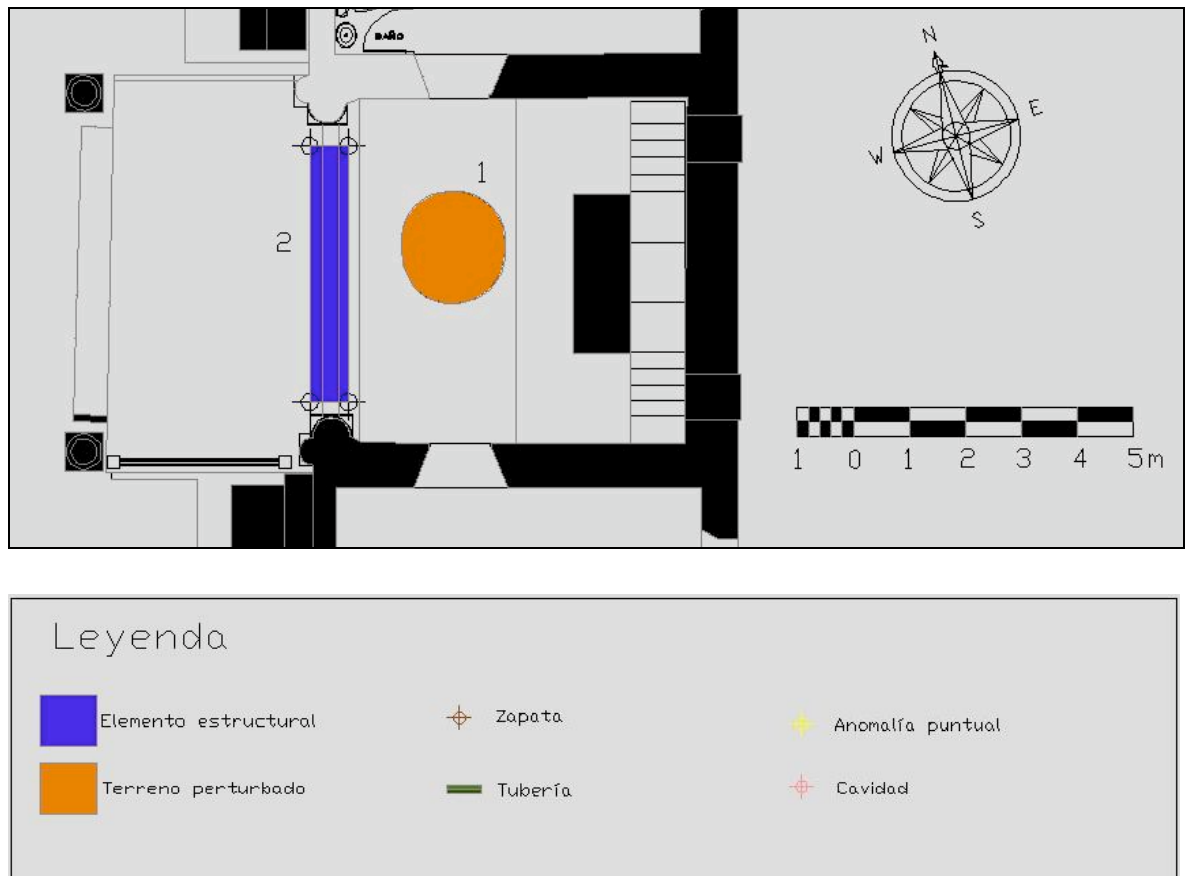


Figura 63. Anomalías en altar principal (área 4).

Espesor de concreto entre 22 y 26 cm sin la existencia de malla metálica.

Tabla 11. Clasificación de anomalías en altar principal (área 4).

Nro. Anomalía	Profundidad (m)	Tipo Anomalía
1	0,05 - 0,45	Terreno perturbado
2	0,02 - 0,31	Elemento estructural

En el área del altar se observa una anomalía estructural con orientación norte-sur por debajo del arco en toda su extensión (figura 63), indicando una estructura subterránea conectada a las columnas de cada lado.

La anomalía ubicada en la parte central del altar se asocia a un enterramiento de sacerdotes del templo. En la superficie se pueden observar tres losas, estando la anomalía por debajo de la que se muestra en la figura 64.



Figura 64. Losa ubicada en el altar del templo.

5.2.5 Área 5. Cuarto Sur

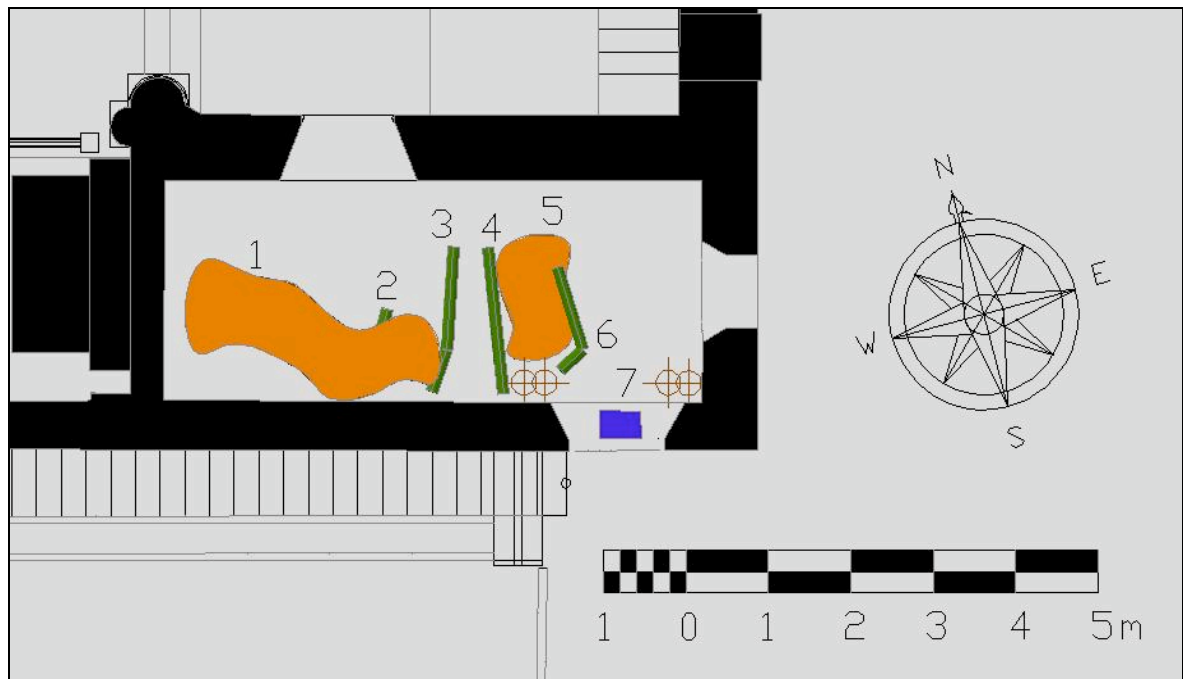


Figura 65. Anomalías en cuarto sur (área 5).

Espesor de concreto entre 18 y 22 cm sin la existencia de malla metálica.

Tabla 12. Clasificación de anomalías en cuarto sur (área 5).

Nro. Anomalía	Profundidad (m)	Tipo Anomalía
1	0,13 - 0,77	Terreno perturbado
2	0,3	Tubería
3	0,23	Tubería
4	0,23	Tubería
5	0,44 - 0,83	Terreno perturbado
6	0,2	Tubería
7	0,23 - 0,60	Elemento estructural

En el área del cuarto sur (figura 65) se observan dos anomalías de terreno perturbado las cuales presentan poca profundidad para ser considerados enterramientos directos, en la zona se observan también anomalías relacionadas con tuberías sin embargo las anomalías 2 y 6 no presentan continuidad suficiente pudiendo ser segmentos que quedaron enterrados de instalaciones anteriores.

La anomalía 7 observada en la puerta sur del cuarto puede estar relacionada con la estructura de manera similar a las observadas en las puertas de acceso interno de las naves norte y sur del templo.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- A partir de los radargramas y secciones interpretadas se logró generar un modelo en el cual se definen lugares de interés arqueológico mediante el estudio de las anomalías y su clasificación tanto en el interior como en el exterior del templo de Santa Ana del Norte.
- El alcance en profundidad logrado es hasta 1,5 m por las condiciones del terreno del área en estudio, obteniendo información de los objetivos presentes desde los primeros centímetros del espesor del concreto del piso del templo e incluyendo anomalías causadas por el mallado metálico del piso, tuberías enterradas, fundaciones y anomalías puntuales posiblemente causadas por cantos en el subsuelo.
- Para caracterizar y proponer las causas de las diversas anomalías encontradas es necesario contar con gran cantidad de información histórica y arqueológica correctamente registrada e implica un trabajo de asesoramiento con expertos en el área histórica y arquitectónica del templo. En el proceso de interpretación las causas de algunas anomalías pueden ser ambiguas debido al bajo contraste de algunos objetivos respecto al medio, como los enterramientos directos, es por eso que solo mediante excavaciones se podrá conocer la causa de esos comportamientos. Algunas de las anomalías observadas no se han logrado explicar mediante la información histórica recopilada.
- Algunos factores como el acceso difícil en algunos lugares del templo y las barreras colocadas alrededor del mismo limitaron la extensión y la adquisición de los datos. La presencia de la malla de concreto en el

subsuelo ha sido un factor causante de ruido impidiendo lograr una mejor visualización de algunos objetivos.

- La técnica de GPR ha probado ser una herramienta de gran utilidad en la exploración no invasiva del templo, mostrando alta sensibilidad ante los contrastes en el subsuelo somero, lo cual es de importante valor para la conservación del patrimonio cultural y en las labores arqueológicas.
- Las diversas frecuencias de antenas permiten delinear y definir a diferentes escalas los contrastes en el subsuelo, por lo cual es de gran utilidad contar con la participación de arqueólogos y arquitectos en la planificación para la adquisición de datos.

Recomendaciones

- Se recomienda contrastar la información obtenida con la de otros métodos geofísicos como es el caso de métodos gravimétricos, magnéticos, eléctricos cuando sea posible ya que es de utilidad a la hora de realizar la identificación de anomalías y el modelado de las mismas en el subsuelo.
- Para investigaciones con mayor nivel de detalle en objetivos específicos se puede recurrir a la simulación, la cual puede realizarse si se cuenta con información geológica del subsuelo y de las propiedades electromagnéticas y geometría del objetivo.
- El trabajo interdisciplinario continuo entre geofísicos y arqueólogos en todas las fases del proyecto es de gran importancia para la aplicación de procesamientos y en la generación de modelos de anomalías.

- Se recomienda realizar una cobertura homogénea en del área en estudio de acuerdo con la escala de los objetivos buscados para contar con información suficiente que permita definir los límites y las diversas geometrías de las anomalías en la zona.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS

- Annan, A. (1999). Practical Processing of GPR Data. Sensors & Software Inc. Ontario, Canada. 18 p.
- Annan, A. (2001). Ground Penetrating Radar. Workshop Notes. Sensors & Software Inc. Ontario, Canada. 197 p.
- Baradello, M., J. M. Carcione y D. Gei (2004). Fast monostatic GPR modelling. Geophysics, vol. 69, nro.2, marzo-abril 2004. Pág. 466-471.
- Baradello, L (s/f). Figuras de arreglos de adquisición con GPR. Obtenida de <http://www.lucabaradello.it/index.html>
- Bordehore, J. (2005). Técnicas Geofísicas de reconocimiento del Subsuelo: Georadar y Tomografía Eléctrica. Casos Prácticos. Rudnik Ingenieros Consultores.
- Caravallo, T. (2007). Estudio de las condiciones actuales y Propuesta de protección provisional del Templo Santa Ana del Norte.
- Cataldi, A. (2000). Aplicación de la metodología de GeoRadar (Ground Penetrating Radar) en la investigación No Invasiva de Estructuras y del Subsuelo. Metodología, Ejemplos, Ventajas y Limitaciones. TRX Consulting. Caracas, Venezuela.
- Chinchilla, O. (2006). Proyecto Arqueológico Cotzumalguapa. Universidad Francisco Marroquín. Guatemala. 56 p.
- Chinchilla, O. y H. Heff (2008). Estudio Geofísico y Arqueológico de Conjuntos Habitacionales Prehispánicos en Cotzumalguapa. Instituto Panamericano de Geografía e Historia. Guatemala. 11 p.

- Churion, J. (1857). Colección de Métodos Prácticos para los Albañiles y demás Artesanos y Constructores que no conocen el cálculo. Imprenta Republicana de Federico Madríz. Caracas, Venezuela.
- Dayton, A. (2004). Prospección Geofísica en Khonkho Wankane. Universidad de Boston. 65 p.
- Fonseca, F. (s/f) Método electromagnético de Ground Penetrating Radar (GPR), y sus diferentes aplicaciones. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sede Sogamoso. Presentado en el XIII Congreso Venezolano de Geofísica.
- Ingegneria dei Sisteimi (IDS) (s/f). Especificaciones técnicas de GPR modelo K2. Obtenido de <http://www.idscopy.it>
- López, E. (2004). Iglesia Santa Ana del Norte, Evaluación Estructural. Informe Técnico.
- Lorenzo, E. y M. Hernández (1995). Prospección geofísica en yacimientos arqueológicos con geo-radar en España. Dos casos: Numancia y El Paular. Universidad Complutense, España. Física de la Tierra n° 7, 193-205.
- Márquez, A. (2005). La iglesia Santa Ana del Norte. Publicación de la Alcaldía del Municipio Gómez, Santa Ana.
- Martín, J. (2004). Análisis del Subsuelo utilizando Técnicas Geofísicas. Sistema Georradar RAMAC/GPR. Memoria del VIII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía TOPCART 2004. Madrid, España. 17 p.
- Oppenheim, A. y A. Willsky (1998). Señales y sistemas. 2da edición, Editorial Prentice Hall. México. 956 p.

- Orihuela, N., L. Vierma, J. Sánchez y M. Herrera (2002). Investigación geotécnica aplicada a estudios arqueológicos en la Iglesia San Rafael de Orituco. Municipio Monagas, Estado Guárico. Presentado en el XI Congreso Venezolano de Geofísica.
- Pérez, R. (2007) Uso del Georadar como herramienta para la ubicación de utilidades y vacíos en zonas urbanas y aplicaciones de los perfiles de resistividad y polarización inducida en prospección minera. Informe final presentado para optar al título de Ingeniero Geofísico. Universidad Simón Bolívar, Caracas. Venezuela. 113 p.
- Piñero, V. (2007). Fotografías de técnicas de construcción.
- Ponce, R., D. Argotte, R. Chávez y M. Cámara (2004). Empleo de los Métodos Geofísicos en la Prospección Arqueológica Urbana: La Basílica de Nuestra Señora de la Salud, Patzcuaro, México. TRABAJOS DE PREHISTORIA 61, nro 2, 2004, pp. 11 a 23.
- Petroleos de Venezuela (2003), Código Geológico de Venezuela.
- Román, L (2004). Reconocimiento arqueológico discreto del contexto inmediato como del templo para el registro arqueológico y el proyecto de restauración y puesta en valor. Santa Ana, Nueva Esparta.
- Román, L. (2007). Templo Santa Ana del Norte. La arqueología del sitio: Presentación, evaluación y recomendaciones sobre el proceso de restauración.
- Sánchez, T. (2003). Estudio Geotécnico Iglesia de Santa Ana del Norte, Isla de Margarita, Estado Nueva Esparta. Informe Técnico.
- Sesto, E. (2008). Caracterización Geoeléctrica del Cementerio de Los Ingleses en Aroa, Estado Yaracuy. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas. 115 p.

- Urbani, F.; Hackley P.; Karlsen A. y Garrity C. (2005). Geologic shaded relief map of Venezuela. USGS.
- Vertullo, G. (2006). Iglesia Santa Ana del Norte. Informe de revisión del Proyecto de Intervención. Santa Ana del Norte, Municipio Gómez, Estado Nueva Esparta.
- Vertullo, G. (2007). Fotografías de inspección en la Iglesia Santa Ana del Norte, Estado Nueva Esparta.
- Vierma, L. (2007). Evaluación del informe Excavación Arqueológica en la Iglesia de Santa Ana, elaborado por la Dra. Esther Izaguirre. Instituto de Patrimonio Cultural, Caracas. 133 p.
- Villarroel, M. (2003). Iglesia Santa Ana del Norte, Santa Ana-Municipio Gómez. Estudio Histórico – Arquitectónico. Gobernación del Estado Nueva Esparta.
- Wtorek, J. (2003). EUDEM2 Technology Survey Electrical and Magnetic Properties of Soil. 51 p.
- Figuras de campo magnético. Obtenidas el 14 de octubre de www.cobaes.edu.mx/2005/fisica/fisica2/topics/t197m.htm.
- Zucchi, A. (2000). Polvo eres y en polvo te convertirás: la muerte y su entorno en Venezuela hasta 1940. 93-94 2000, Fundación La Salle. Instituto Caribe de Antropología y Sociología.
- Zurita, O. y A. Cataldi (2002). Adquisición y Procesamiento Avanzado de Datos de Ground Penetrating Radar. Memorias del XI Congreso Venezolano de Geofísica. Caracas.

APENDICES

Imágenes del modelo tridimensional de anomalías en el templo

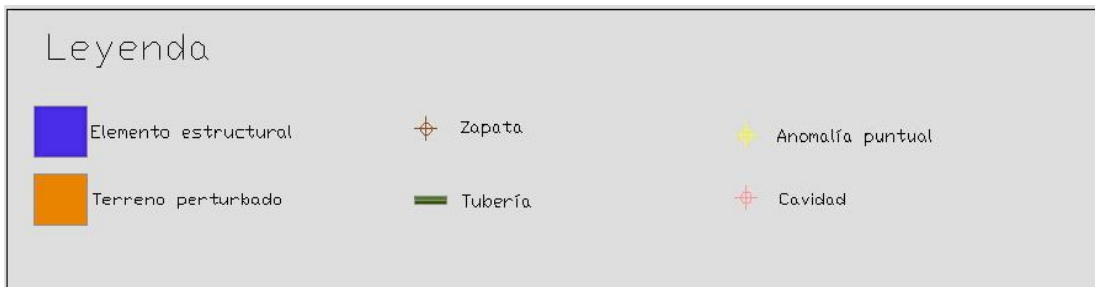
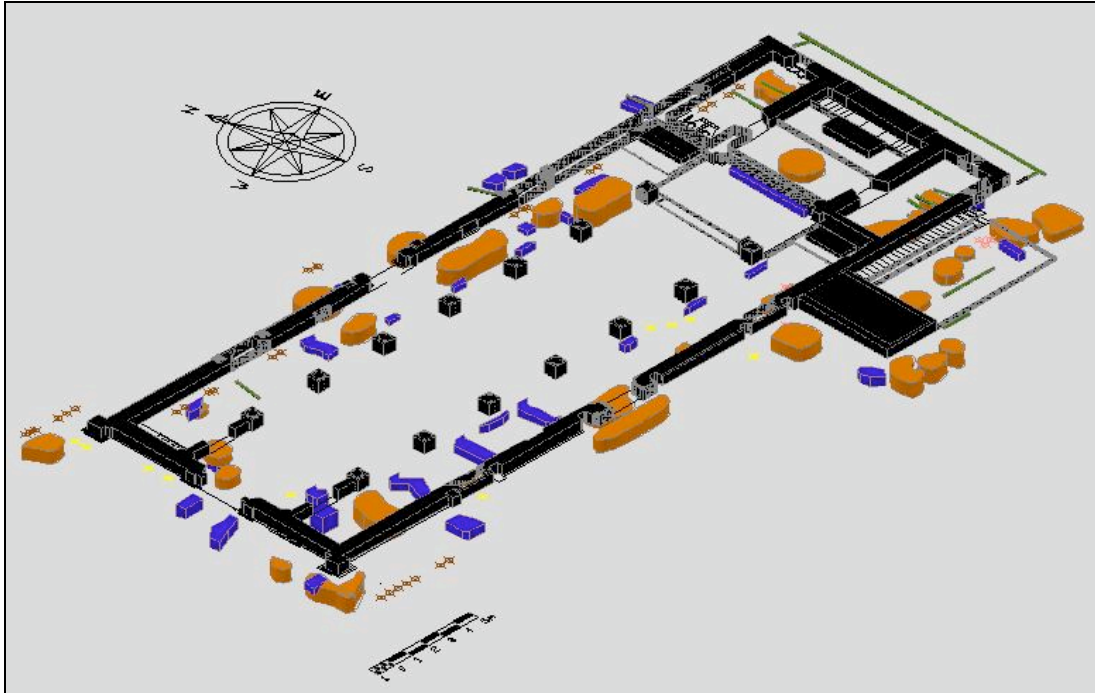


Figura 66. Vista desde el suroeste del modelo de anomalías en el templo

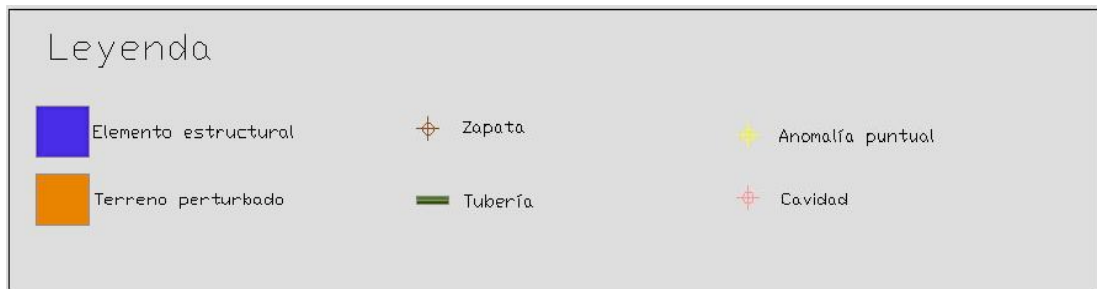
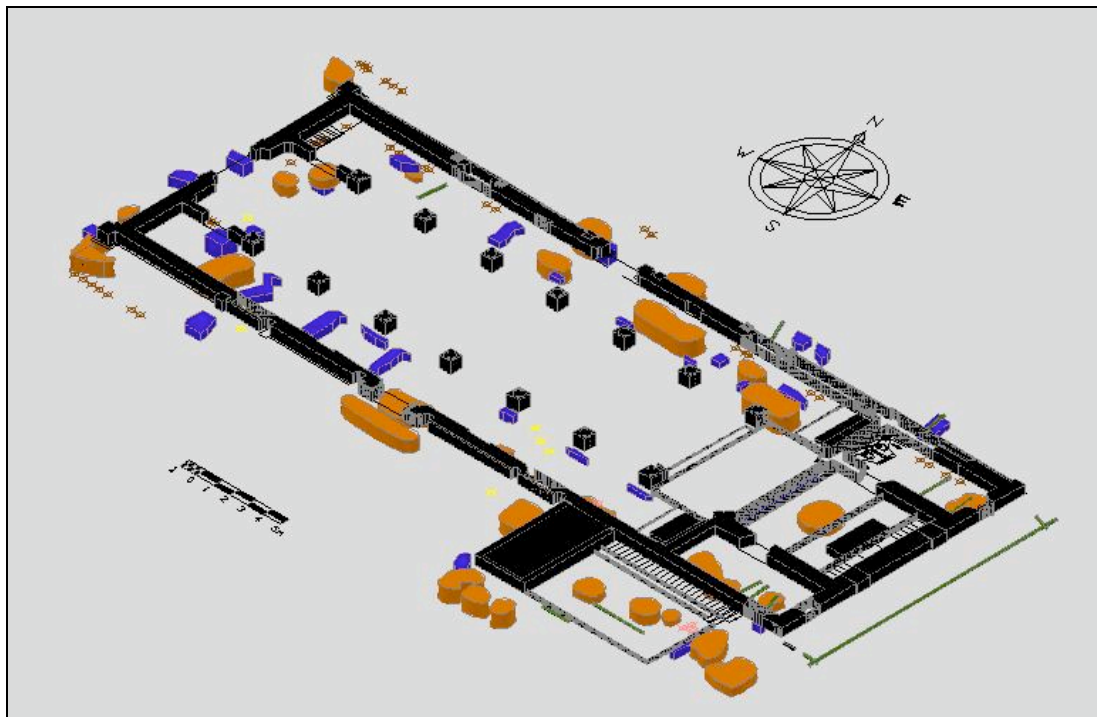


Figura 67. Vista desde el sureste del modelo de anomalías en el templo

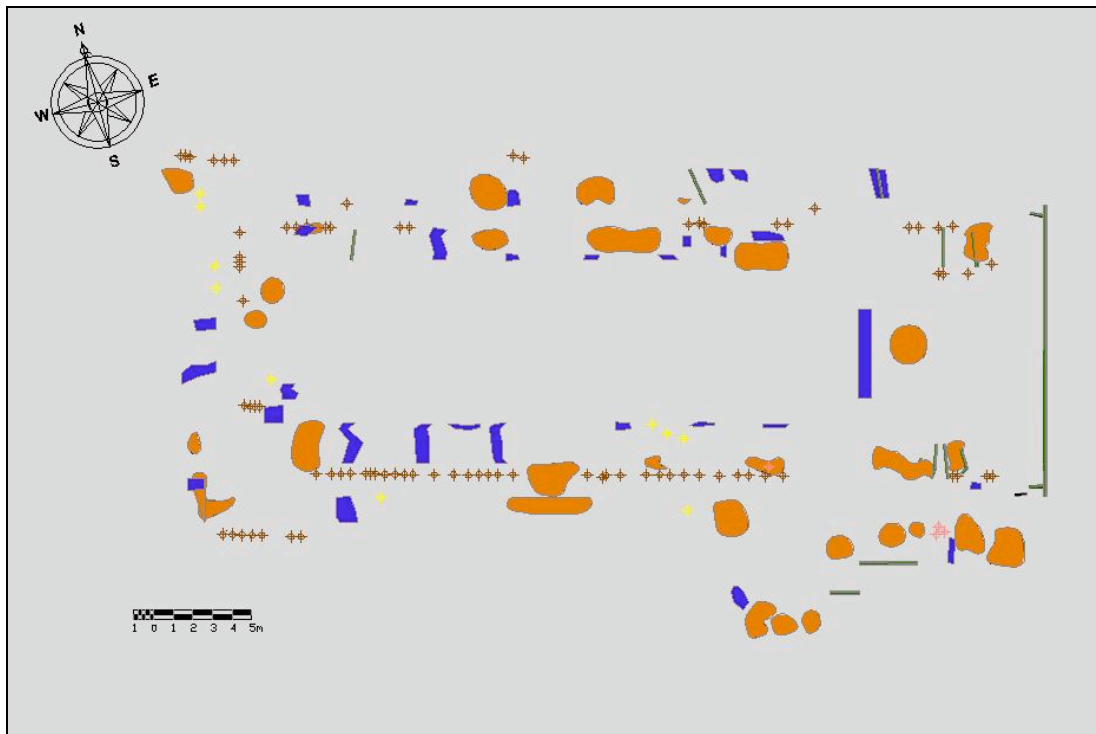


Figura 68. Vista superior del modelo de anomalías sin la planta del templo

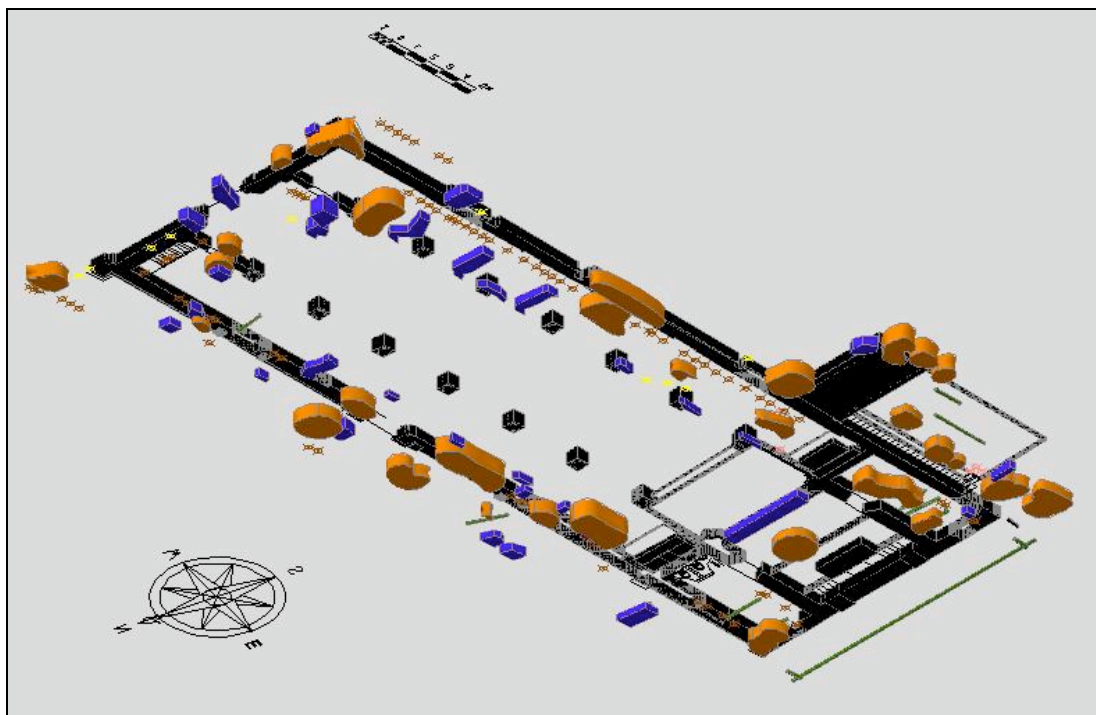


Figura 69. Vista inferior desde el suroeste del modelo de anomalías en el templo

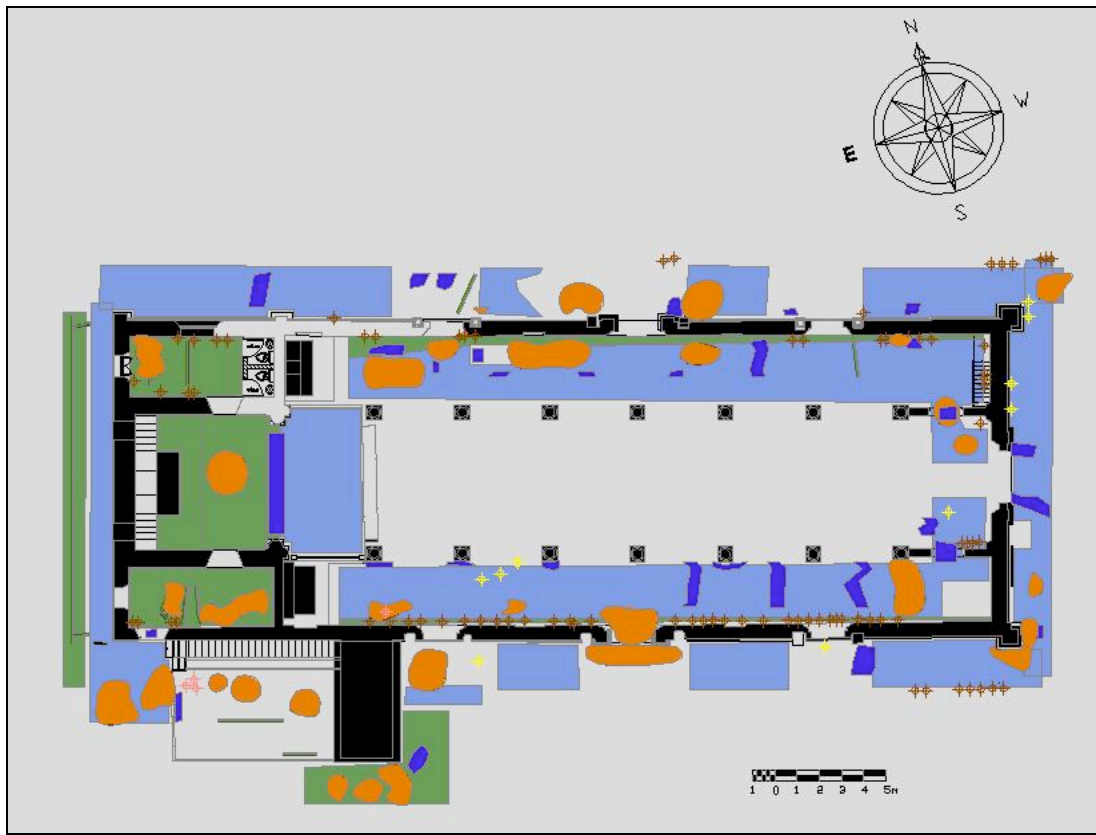


Figura 70. Vista inferior del modelo de anomalías en el templo

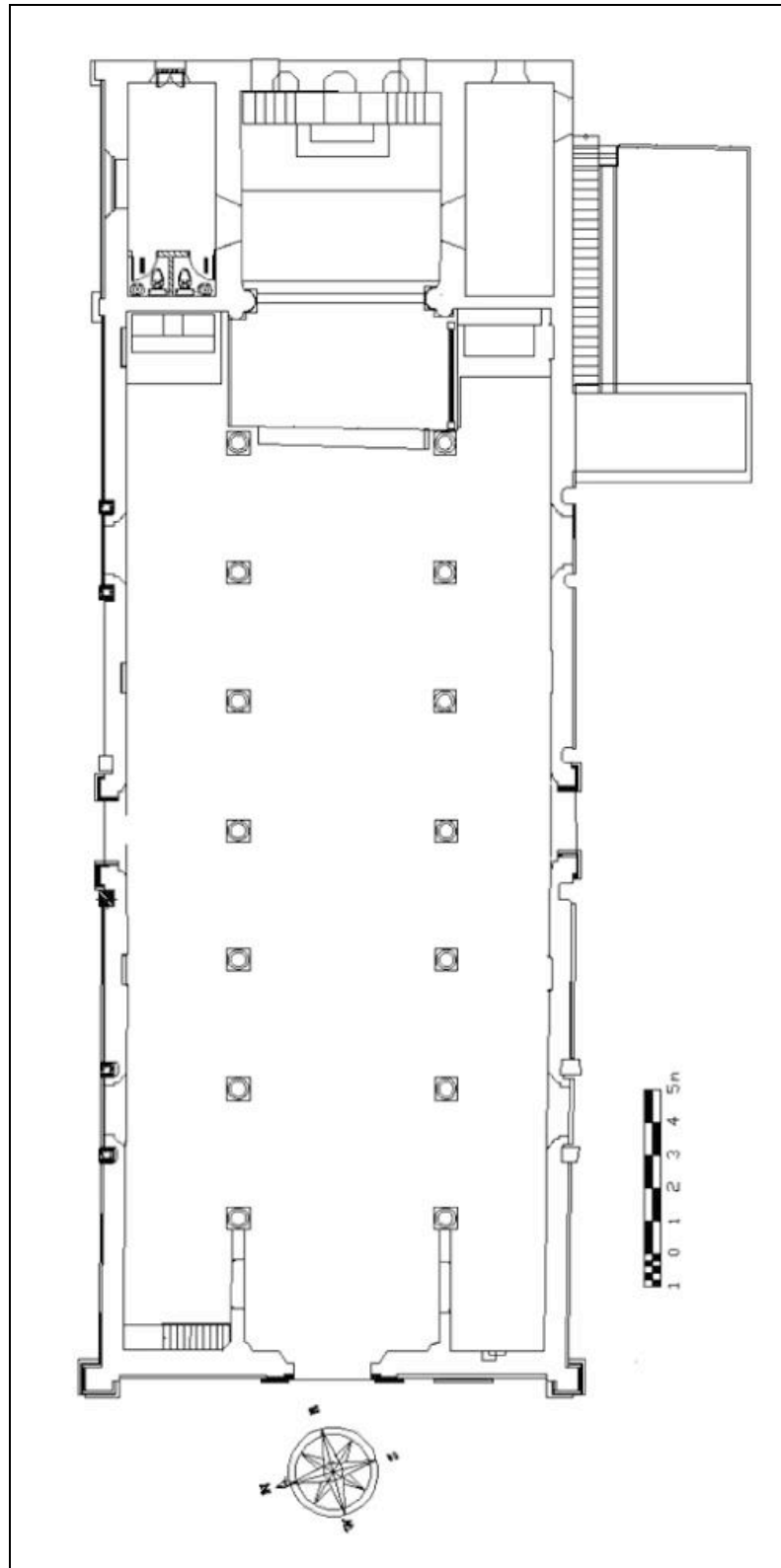


Figura 71. Planta de la iglesia Santa Ana del Norte

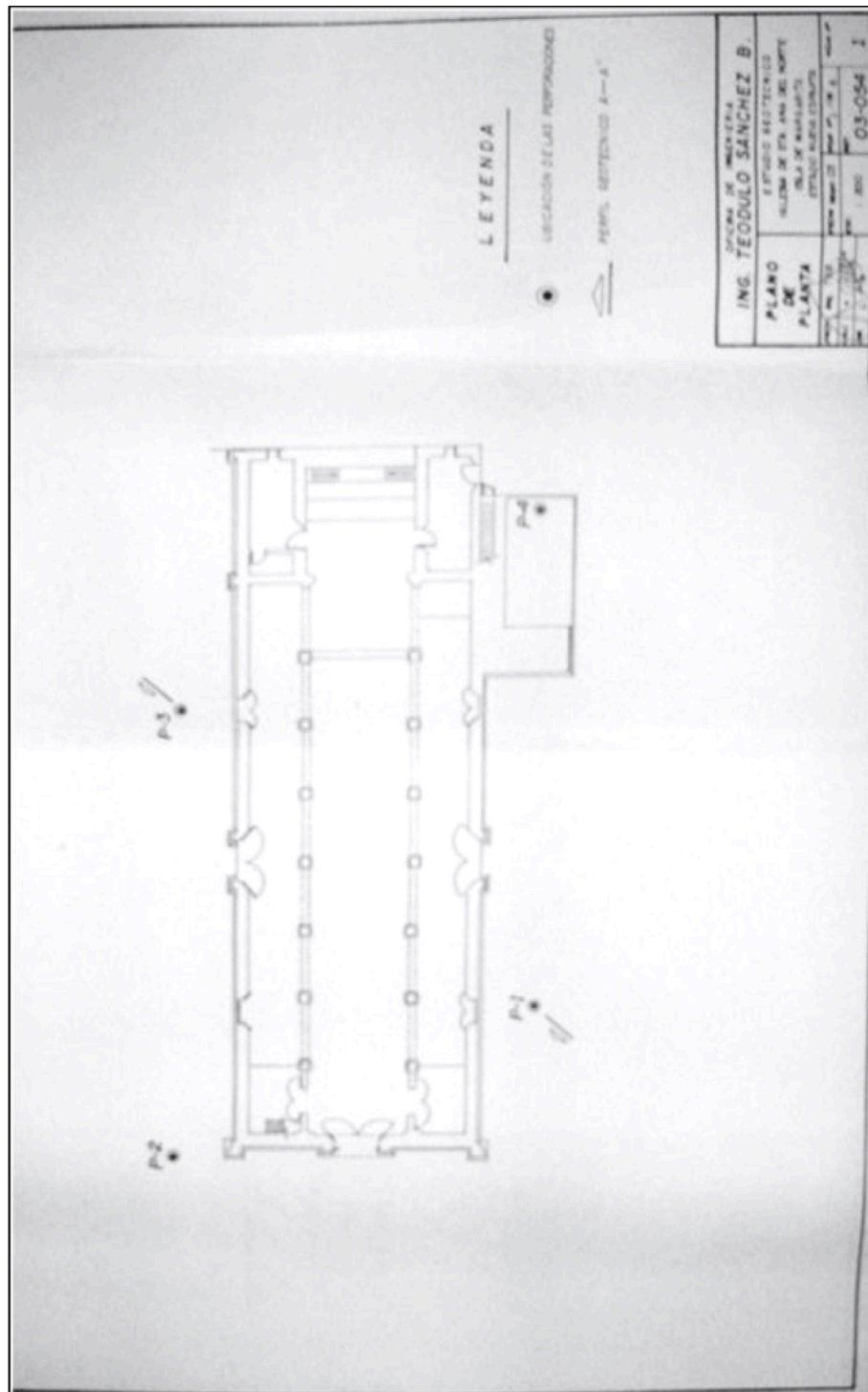


Figura 72. Ubicación de perforaciones del estudio geotécnico (tomado de Sánchez, 2003)



LEYENDA

- | | | | | | |
|--|--------------------------------|--|---------------------------|--|-----------------------------|
| | Relleno limo arenoso con grava | | Arcilla arenosa con grava | | Arena arcilla gravosa |
| | Arena limo gravosa | | Grava arena limosa | | Arcilla de alta plasticidad |

Figura 73. Perfil geotécnico generalizado (modificado de Sánchez, 2003)