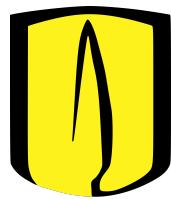


# **Conversión de archivos CAD a geometrías de gprMax y análisis de su desempeño en simulaciones FDTD**



**Universidad de los Andes  
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica**

Roberto Bustamante Miller  
Gabriel Andrés Pérez González

Agosto 2022

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2. Discretización de un archivo 3D diseñado en CAD</b>	<b>3</b>
<b>3. Modelado y simulación de las antenas GSSI y MALA de gprMax</b>	<b>6</b>
3.1. Resultados . . . . .	9
<b>4. Simulación de una antena de bocina rectangular en gprMax</b>	<b>12</b>
4.1. Construcción de un puerto coaxial . . . . .	12
4.2. Simulación de la antena de bocina . . . . .	15
4.2.1. Obtención de los parámetros de radiación en campo cercano	17
<b>5. Simulación de la antena PowerLOG en gprMax</b>	<b>19</b>
5.1. Antena en el espacio libre . . . . .	19
5.2. Escenario con arena . . . . .	20
5.3. Escenario con arena y esfera metálica . . . . .	22
5.4. Simulaciones de la antena PowerLOG usando linea de transmisión coaxial desde la frontera de absorción . . . . .	23
<b>6. Conclusiones y trabajo Futuro</b>	<b>26</b>

## **1. Introducción**

En el presente documento se reportan los resultados obtenidos al implementar el software stl-to-hdf5-gprMax. Se trata de un programa construido para el proyecto Desminado Humanitario, por medio de este se permitirá transformar uno o varios objetos dibujados en cualquier software de modelado 3D y en un archivo de formato *.stl* en un objeto entendible por el software de simulación gprMax. Para esto, se tomó como base el programa stl-to-voxel que transforma la geometría de una malla 3D en una geometría descrita por una matriz tridimensional, tal como la geometría usada en gprMax. Para el análisis de desempeño del programa stl-to-hdf5-gprMax, se dibujaron en Autodesk Inventor 2021 las antenas GSSI y MALA de gprMax para posteriormente ser transformadas utilizando el software construido. De esta manera, se compararán los resultados obtenidos en las respuestas de las antenas implementadas por defecto en gprMax con las que se obtuvieron de los dibujos 3D. Finalmente, se evaluarán dos tipos de antena que inicialmente se dibujaron en CAD para ser convertidas en geometrías de gprMax. Se compararán los resultados obtenidos en la simulación de gprMax y el software licenciado "Ansys HFSS".

## 2. Discretización de un archivo 3D diseñado en CAD

Las herramientas de diseño y dibujo asistido por computadora (CAD) son el estándar actual para el modelado de geometrías en 3D. Estos programas aproximan superficies por medio de polígonos, generalmente triángulos, como se muestra en la figura 1; donde se nota que una aproximación más precisa requiere de un tamaño más pequeño de polígono.

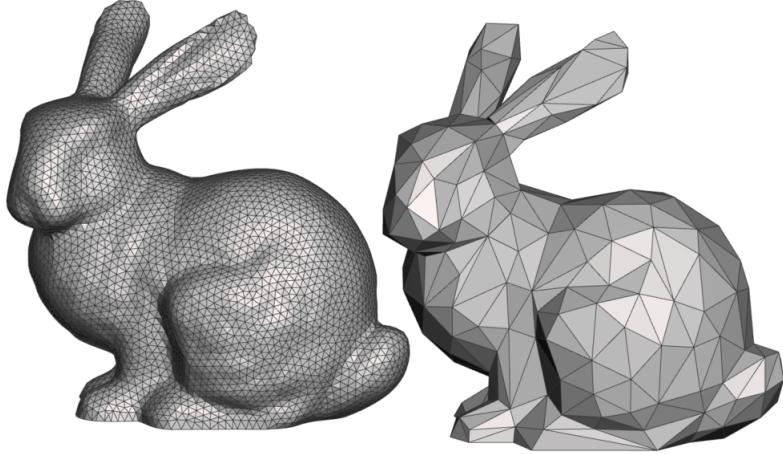


Figura 1: Representación 3D en malla de triángulos.

Por otro lado, el software de simulación de ondas electromagnéticas en el dominio del tiempo, gprMax, requiere otro tipo de geometría diferente a la representación 3D por mallado de polígonos. Dado que gprMax usa la técnica FDTD, la cual requiere de discretizar el espacio 3D en celdas cúbicas o una matriz de 3 dimensiones. La técnica de representación del espacio 3D es similar a lo que hace una fotografía o imagen en 2D, asignar a cada punto del espacio un *pixel* de determinado valor. Por esto, cada celda de la matriz 3D que representa el espacio es denominada *voxel* (del inglés *volumetric pixel*). Al igual que el método de malla de triángulos, la representación por *voxels* se hace más precisa al disminuir el tamaño de celda, como se indica en la figura 2.

Para convertir una representación 3D en una geometría basada en cubos, se usará un algoritmo de *voxelization*. En el presente trabajo, se utilizó el algoritmo implementado en el programa *stl-to-voxel*, que se encuentra disponible en GitHub. Este programa toma uno o varios archivos en formato *.stl* y le aplica el proceso de *voxelization* asignando a cada archivo un número entero distinto dentro de la matriz 3D que representa la geometría del espacio. Además, en el repositorio de este trabajo, se encuentra el código fuente que se implementó basándose en *stl-to-voxel* para transformar un archivo *.stl* en un *.h5* entendible

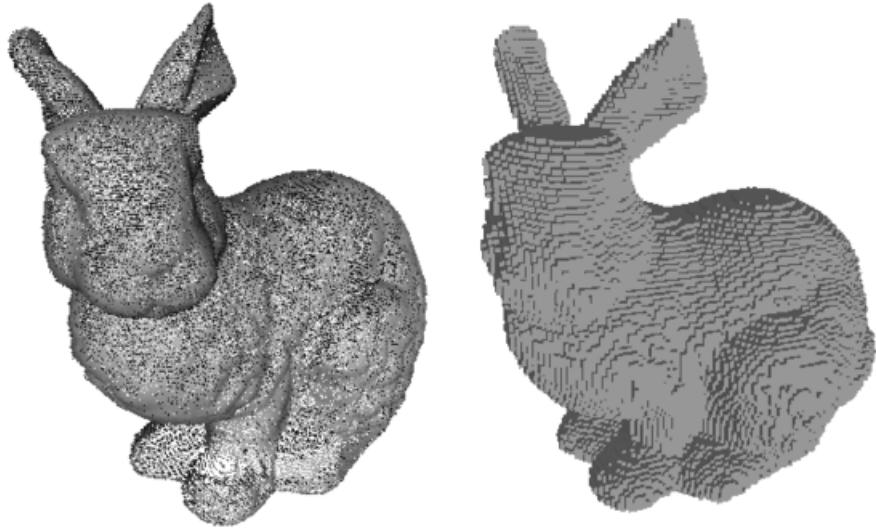
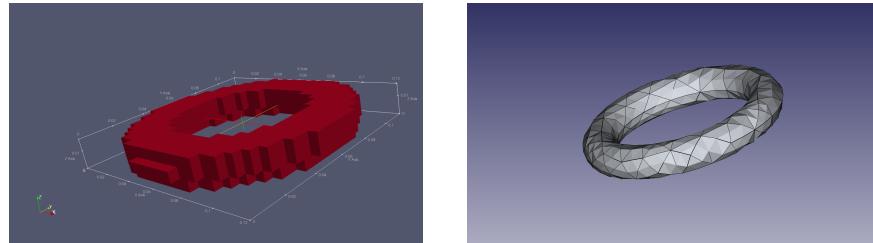


Figura 2: Representación 3D en *voxels*

por gprMax. Se recomienda revisar este repositorio en el cuál se encuentran las instrucciones para convertir cualquier archivo *.stl* con la resolución deseada.

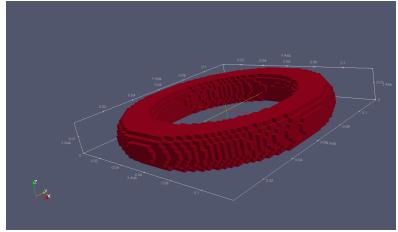
A continuación, se muestra un sólido con forma de toroide modelado en 3D con diferentes tamaños de malla y el mismo archivo transformado en una geometría de gprMax visualizado en ParaView.



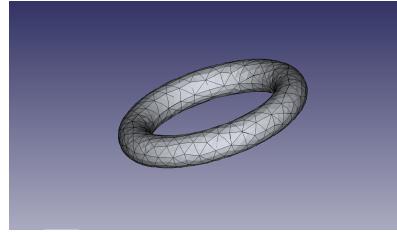
(a) Representación por *voxels*.

(b) Representación por malla de triángulos.

Figura 3: Toroide con 5mm de resolución

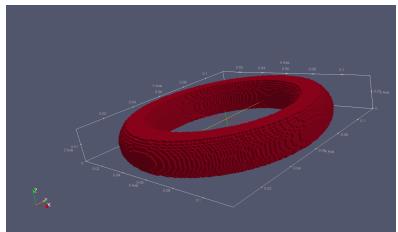


(a) Representación por *voxels*.

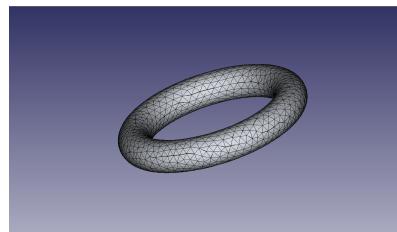


(b) Representación por malla de triángulos.

Figura 4: Toroide con 2mm de resolución

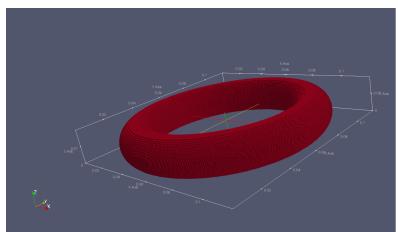


(a) Representación por *voxels*.

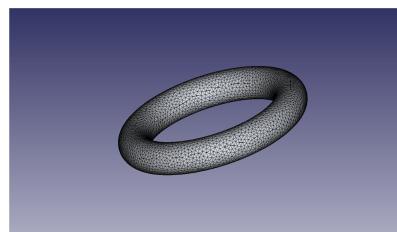


(b) Representación por malla de triángulos.

Figura 5: Toroide con 1mm de resolución



(a) Representación por *voxels*.



(b) Representación por malla de triángulos.

Figura 6: Toroide con 0.5mm de resolución

### 3. Modelado y simulación de las antenas GSSI y MALA de gprMax

El software gprMax contiene dos antenas predeterminadas, GSSI 1500MHz y MALA 1200MHz. Son antenas de tipo corbatín y su geometría 3D fue construida usando las clases predeterminadas de gprMax para objetos 3D de material específico. Es decir, la construcción de estas antenas fue manual, escribiendo código fuente de gprMax y no por medio de un software de dibujo 3D. Para comparar y evaluar el funcionamiento del programa diseñado, stl-to-hdf5-gprMax, se construyó un modelo 3D en Autodesk Inventor de las antenas GSSI 1500MHz y Mala 1200MHz para posteriormente exportarlo en formato *.stl* y convertirlo a un objeto de gprMax.

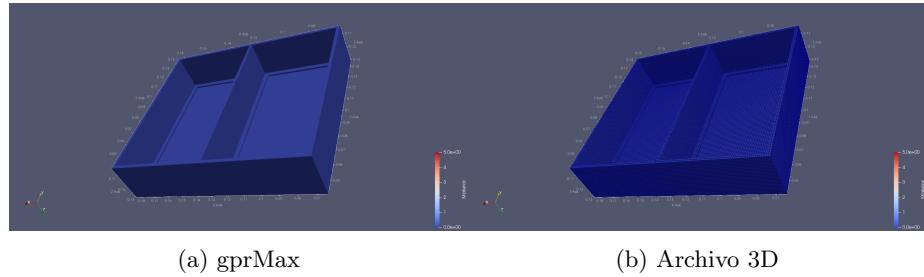


Figura 7: GSSI - Material *pec*

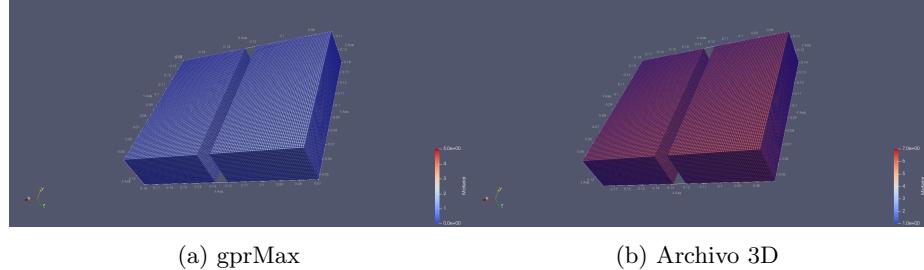


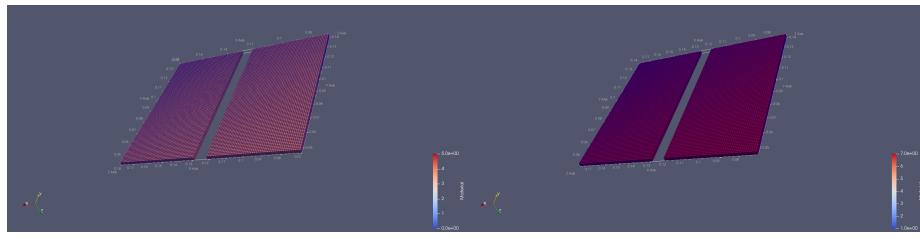
Figura 8: GSSI - Material *absorber1*



(a) gprMax

(b) Archivo 3D

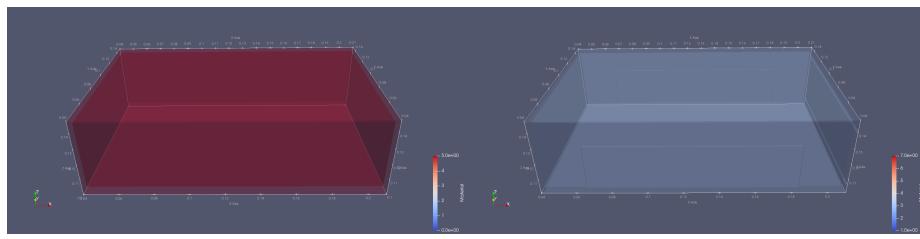
Figura 9: GSSI - Material *absorber2*



(a) gprMax

(b) Archivo 3D

Figura 10: GSSI - Material *pcb*

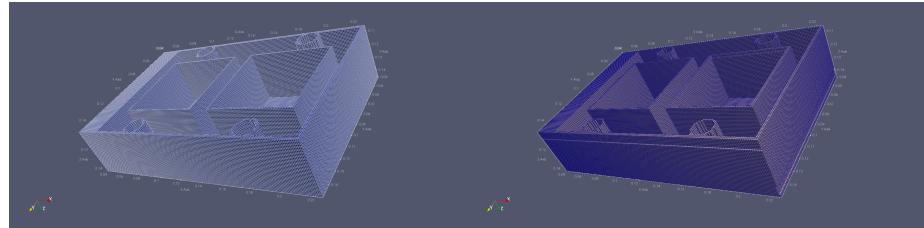


(a) gprMax

(b) Archivo 3D

Figura 11: GSSI - Material *hdpe*

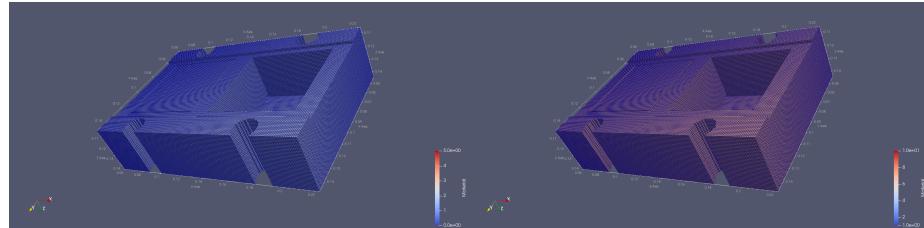
Puede verse que cada componente de la antena GSSI resultado del proceso de *voxelization* es idéntico a la antena GSSI de gprMax. A excepción del material *hdpe* que se muestra en la figura 11, en el cual puede observarse una diferencia mínima en las caras del material que son transversales a los ejes *x* y *y* (ver figuras 11a y 11b).



(a) gprMax

(b) Archivo 3D

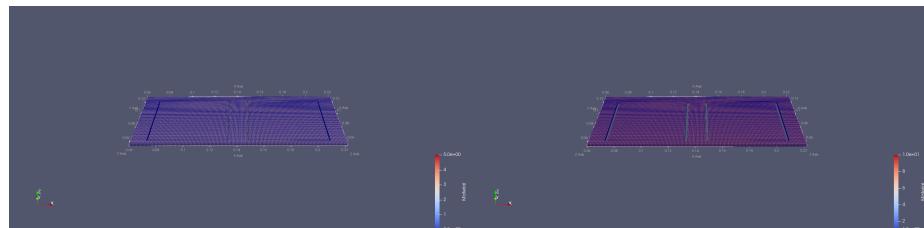
Figura 12: MALA - Material *pec*



(a) gprMax

(b) Archivo 3D

Figura 13: MALA - Material *absorber1*

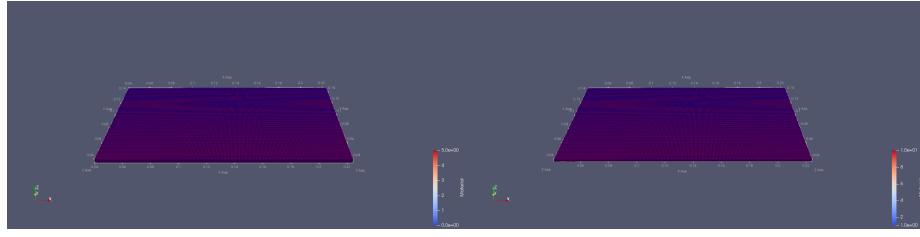


(a) gprMax

(b) Archivo 3D

Figura 14: MALA - Material *pcb*

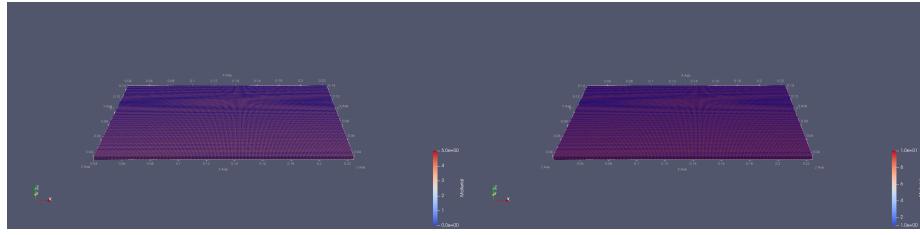
En este caso, la generación del objeto en gprMax por medio de un archivo *.stl* consigue ser idéntica a la geometría implementada en gprMax a excepción del material *pec*. En la figura 12b se logra ver que existen muescas de 1mm (una celda) de profundidad en el exterior del material. Dado que es algo similar a lo



(a) gprMax

(b) Archivo 3D

Figura 15: MALA - Material *pcb*



(a) gprMax

(b) Archivo 3D

Figura 16: MALA - Material *hdpe*

que pasaba en la antena GSSI, se evidencia que existe una inexactitud pequeña al generar el material cuya posición está más al exterior de la geometría.

### 3.1. Resultados

La simulación se realizó midiendo el voltaje en los dos puertos de la antena (emisor y receptor). De esta manera, se registrará el voltaje incidente mas el reflejado en el puerto 1 (emisor) y el voltaje recibido en el puerto 2 (receptor). La antena GSSI se excitó con un pulso Gaussiano de frecuencia 1.71GHz, mientras que la antena MALA se excitó con un pulso del mismo tipo y frecuencia 0.978GHz. Las señales en tiempo se muestran en la figura 17.

Los resultados de simulación de los voltajes en el puerto 1 y 2 de la antena GSSI se muestran en la figura 18 y los de la antena MALA en la figura 19.

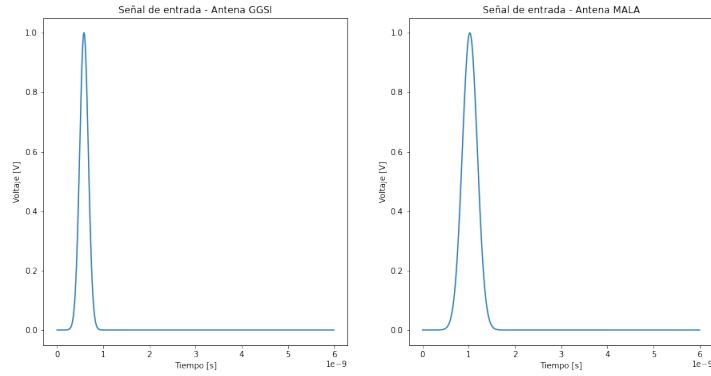


Figura 17: Señales de excitación de las antenas

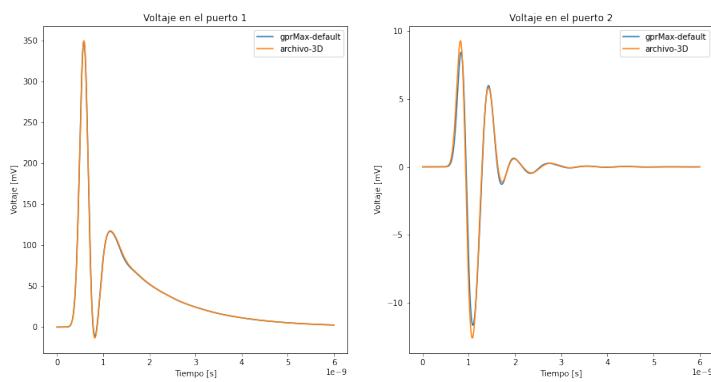


Figura 18: Resultados antena GSSI

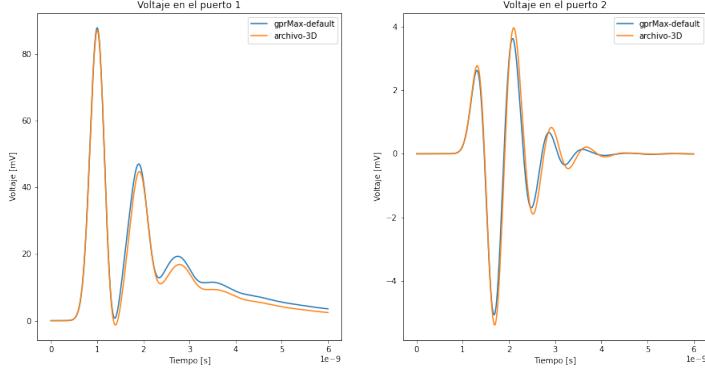


Figura 19: Resultados antena MALA

Puede observarse que los resultados de la simulación son muy similares. No son idénticos, lo cuál indica que existen fuentes de error, la cual corresponde a la inexactitud de conversión del modelo 3D anteriormente vista. Sin embargo, para efectos prácticos se consiguió un método de crear geometrías en gprMax partiendo de herramientas CAD y con una precisión aceptable.

Para acceder a los resultados y archivos de soporte de las simulaciones que se presentaron en esta sección, dirigirse a las siguientes ubicaciones en el repositorio del proyecto:

- Antena GSSI: /Simulaciones/gprMax/GSSI
- Antena MALA: /Simulaciones/gprMax/MALA

Cabe aclarar que se encontrarán los escenarios que se obtuvieron de archivos CAD, ya que las simulaciones por defecto de gprMax se obtienen al descargar el software.

## 4. Simulación de una antena de bocina rectangular en gprMax

En la presente sección, se hicieron varias simulaciones en gprMax y HFSS. Las máquinas utilizadas en gprMax fueron 2, una con GPU y la otra sólo con CPU y alta memoria RAM. La máquina con GPU es del servicio Google Colab y usa una Tesla P100, de 16GB de RAM. La segunda máquina, es un entorno de CPU de Google Colab con alta capacidad de RAM, específicamente 35.24GB de RAM. Por otro lado, las simulaciones en HFSS se hicieron en una máquina de la Universidad de Los Andes, de procesador Intel Core i7-6700T y 16GB de RAM.

Los archivos de soporte y resultados de las simulaciones de encuentran en la ruta del repositorio /Simulaciones/gprMax/Coaxial para el cable coaxial y en /Simulaciones/gprMax/Horn para la antena de bocina.

### 4.1. Construcción de un puerto coaxial

La simulación de una fuente coaxial en FDTD es un desafío histórico abordado en numerosas publicaciones. En este trabajo, el modelo de la línea de transmisión coaxial se basó en [1]. En gprMax, el cable coaxial se hizo de diámetro interior de 2mm y exterior de 6mm con un dieléctrico de 1.735 de constante dieléctrica. De esta manera, la línea de transmisión tiene una impedancia característica de  $50\Omega$ . Se simuló una línea de transmisión coaxial infinita con estas características y excitada con una fuente de voltaje de  $50\Omega$ . La vista longitudinal y transversal de la línea de transmisión se muestra en la figura 20.

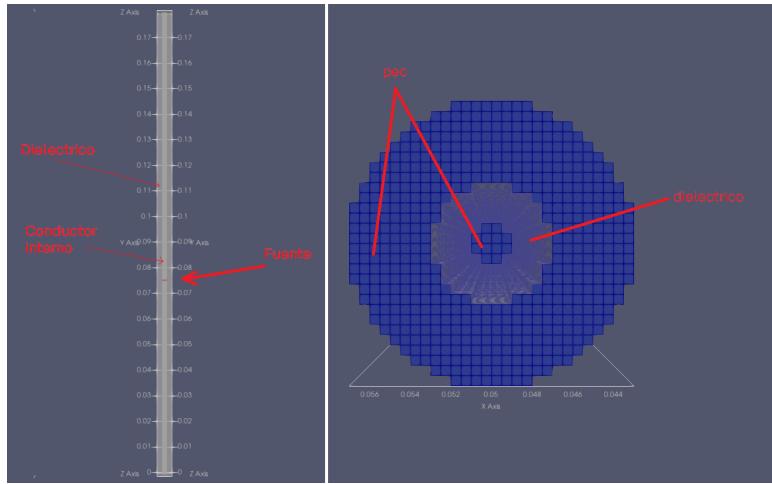


Figura 20: Vista longitudinal y transversal del cable coaxial con resolución de 0.5mm

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 21.

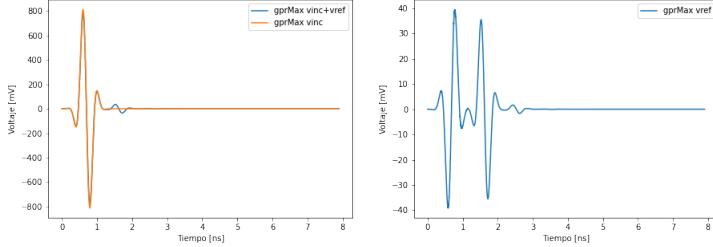


Figura 21: Resultados de simulación en gprMax

En la figura 22 se muestran los resultados para una simulación con las mismas características en el software HFSS.

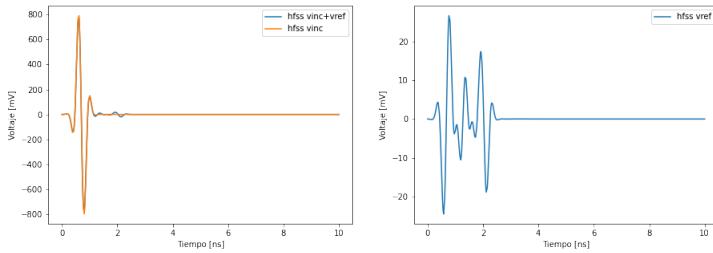


Figura 22: Resultados de simulación en HFSS

Al comparar, se pueden encontrar similitudes en el voltaje reflejado y en los parámetros S. Sin embargo, no se consiguen resultados exactos en términos de amplitud de las señales, como se observa en la figura 23.

Finalmente, los tiempos y memoria requeridos de esta simulación aparecen en la tabla 1:

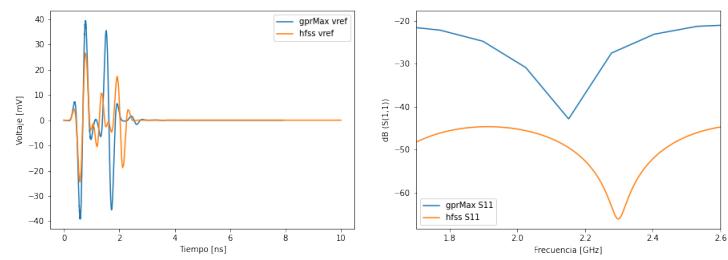


Figura 23: Voltaje reflejado y parámetro S11, comparación gprMax y HFSS

Simulador	Resolución	Memoria RAM	Tiempo de simulación (hh:mm:ss)
gprMax (GPU)	1.0mm	471MB	00:00:21
gprMax (CPU)	0.5mm	2.11GB	00:09:17
HFSS (tiempo)	-	72.1MB	00:00:32
HFSS (frecuencia)	-	72.1MB	00:00:16

Tabla 1: Tiempos y memoria en la simulación del cable coaxial.

#### 4.2. Simulación de la antena de bocina

En la publicación de [2] se documenta el diseño de una antena de bocina rectangular a 2.4GHz y con operación de 1.7GHz a 2.6GHz. Con las dimensiones expuestas en el documento en cuestión, se diseñó la antena en una herramienta de diseño CAD y con el programa stl-to-hdf5-gprMax se convirtió la geometría a un modelo de gprMax. A este mismo modelo, se le añadió un cable coaxial que termina en un monopolo de longitud  $\lambda_0/4$  en el interior de la antena, como se explica en [2]. La fuente de excitación se colocó en el cable coaxial alejada a 11cm del monopolo. Por último, las dimensiones de la línea de transmisión coaxial se dejaron de tal manera que su impedancia característica sea de  $50\Omega$ , al igual que la impedancia de la fuente con la que se hace la excitación. La vista de la antena se muestra en la figura 24.

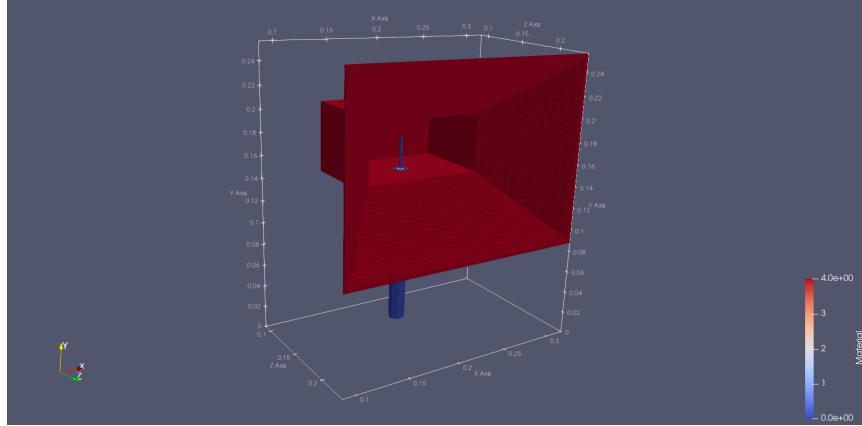


Figura 24: Vista de la antena de bocina en gprMax

La excitación fue un pulso de banda ancha de 1.7GHz a 2.6GHz. De esta simulación, se obtuvieron los voltajes en el puerto que se muestran en la figura 25.

Por otro lado, para comparar el mismo escenario, en HFSS se simuló una antena con las mismas características. Los resultados se observan en la figura 26.

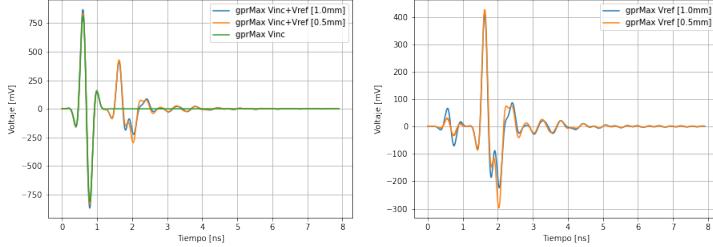


Figura 25: Resultados: Simulación antena de bocina en gprMax

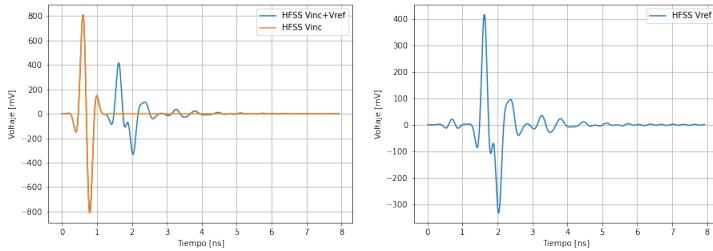


Figura 26: Resultados: Simulación antena de bocina en HFSS

Se observa que en gprMax se logra un resultado muy parecido al de HFSS, y este se mejora en la simulación con 0.5mm de resolución. Al comparar las reflexiones y parámetros S que se muestran en la figura 27 puede observarse la similitud de las señales obtenidas.

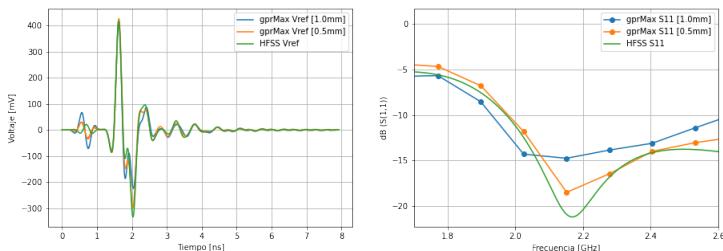


Figura 27: Comparación HFSS vs gprMax - Voltaje reflejado y parámetro S11

El parámetro S11 en las simulaciones de gprMax sigue la tendencia del obtenido en HFSS, sin embargo al ser gprMax un simulador en el dominio del tiempo, no se logra un buen muestreo frecuencial como en HFSS, ya que solo se toman 7 puntos entre 1.7 y 2.6 GHz.

Finalmente, la tabla 2 resume los tiempos de simulación y memoria consumida en cada simulación.

Simulador	Resolución	Memoria RAM	Tiempo de simulación (hh:mm:ss)
gprMax (GPU)	1.0mm	2.45GB	00:02:08
gprMax (CPU)	0.5mm	26.9GB	02:50:12
HFSS (tiempo)	-	3.16GB	02:12:22
HFSS (frecuencia)	-	3.16GB	01:51:20

Tabla 2: Tiempos y memoria en la simulación de la antena de bocina.

#### 4.2.1. Obtención de los parámetros de radiación en campo cercano

Con el objetivo de comparar que en gprMax y HFSS se obtengan similares campos eléctricos radiados por la antena en diferentes puntos del espacio, se obtuvieron los patrones de radiación a 14cm en los planos XY y YZ para una frecuencia de 2.15GHz.

En gprMax, la excitación de la antena se hizo con una señal sinusoidal de 2.15GHz con un encendido suavizado para evitar el efecto de dispersión numérica. La señal de voltaje incidente se muestra en la figura 28.

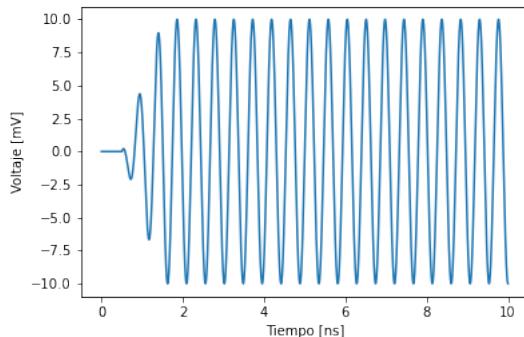


Figura 28: Señal sinusoidal de frecuencia 2.15GHz

Los patrones de radiación obtenidos en ambos simuladores resultan muy similares. En el caso de gprMax, los resultados no varían mucho al cambiar la resolución de 1.0mm a 0.5mm y ambos son muy al resultado de HFSS, como se puede observar en las figuras 29 y 30

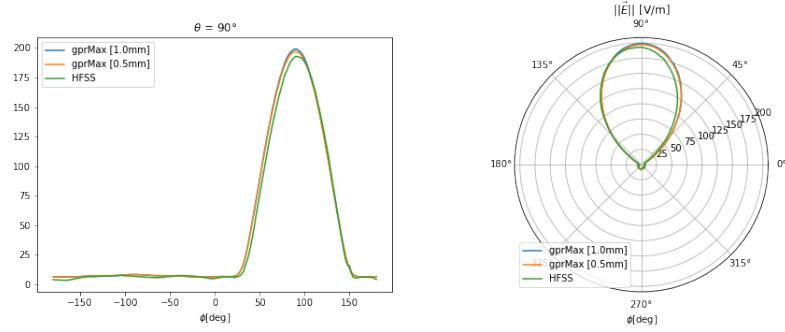


Figura 29: Patrón de radiación en el plano XY

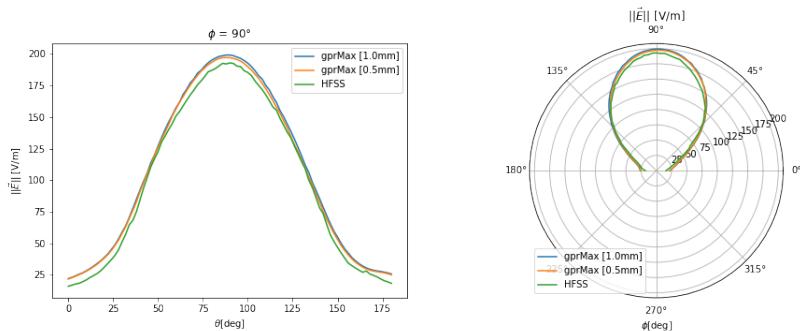


Figura 30: Patrón de radiación en el plano YZ

## 5. Simulación de la antena PowerLOG en gprMax

El laboratorio de Desminado Humanitario cuenta con un GPR que opera con antenas Aaronia PowerLOG 70180. En el proyecto se había construido un modelo 3D para simularlo en HFSS, por lo que este mismo modelo se exportó a formato *.stl* para su transformación a objeto de gprMax. Si bien, con el software *stl-to-hdf5-gprMax* puede generarse el modelo con cualquier tamaño de resolución, en el repositorio del proyecto se encuentran los resultados para una resolución de 0.5mm. En este informe se presentan resultados para 1mm y 0.5mm de resolución, así como comparaciones con HFSS y datos obtenidos del GPR en el laboratorio.

Para las simulaciones, se hizo uso de una máquina virtual de Google Colab de alta capacidad de RAM en los escenarios con resolución de 1mm. Por otro lado, en los escenarios de 0.5mm de resolución se usó una máquina virtual de Google Cloud Platform con 180GB de memoria RAM. En los resultados se presentarán los tiempos y memoria requeridos por la simulación.

Si se quiere acceder a los resultados y archivos de soporte que se presentarán a continuación, revisar la ruta en el repositorio Simulaciones/gprMax/PowerLOG.

### 5.1. Antena en el espacio libre

En primer lugar, se simuló una antena en el espacio libre. En este escenario, tal como en los demás, se dejó una distancia de mínima de  $\lambda/2=15\text{cm}$  desde el PML hasta cualquier punto de material *pec*. Los resultados en el dominio del tiempo para el voltaje medido en el puerto de la antena son los siguientes (figura 31).

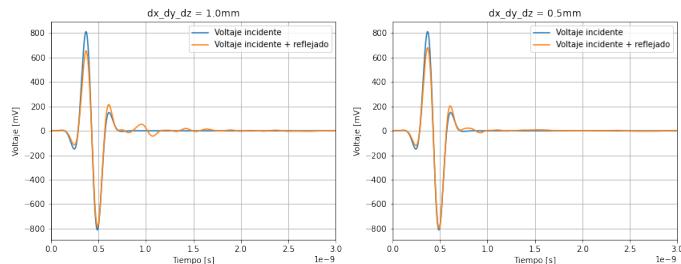


Figura 31: Resultados de la antena PowerLOG simulada en el espacio libre

Si se compara estas señales con la señal incidente original, se ve que existe una mejora al simular con resolución de 0.5mm ya q se disminuyen las oscilaciones no deseadas que ocurren alrededor del nanosegundo 1. Los resultados obtenidos, son comparables con los de HFSS al medir el voltaje en el puerto de la antena, como se observa en la figura 32.

Se observa también que, el parámetro S11 consigue mantenerse por debajo de los -15dB en más puntos del espectro cuando se usa resolución de 0.5mm.

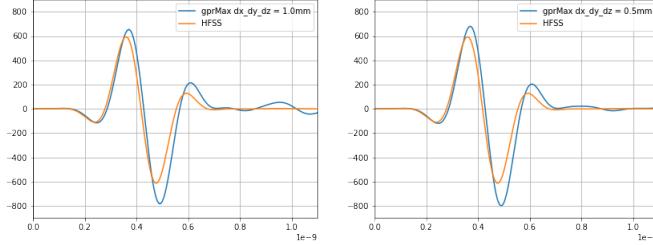


Figura 32: Resultados de la antena PowerLOG simulada en el espacio libre en gprMax y HFSS

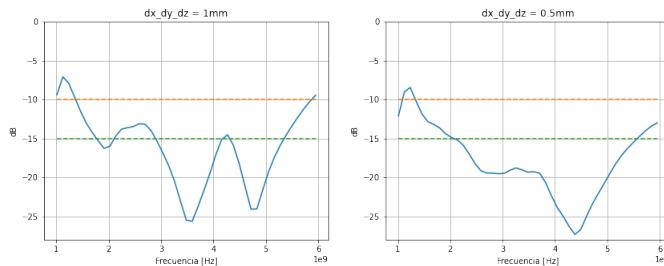


Figura 33: Resultados de la antena PowerLOG simulada en el espacio libre - Parámetro S11

El coste computacional en términos de tiempo y memoria se muestra en la tabla 3.

Resolución	Memoria RAM	Tiempo de simulación (hh:mm:ss)
1.0mm	20.0GB	4:09:23
0.5mm	57.9GB	8:16:33

Tabla 3: Tiempos y memoria en la simulación de la antena en espacio libre.

## 5.2. Escenario con arena

En primer lugar, se simuló un escenario con dos antenas separadas 14cm entre sí y a una altura de 42cm respecto de la arena. Este escenario es una configuración que es posible hacer en el GPR del laboratorio, por lo que se compararán los resultados simulados con experimentales. Sin embargo, por el tamaño del escenario, solo se pudo simular con resolución de 1mm. Los demás escenarios con dos antenas y arena se hicieron con menor distancia entre antenas

y arena, para poder simular con 0.5mm de resolución. Los resultados obtenidos al medir el voltaje en la antena receptora se muestran en la figura 34.

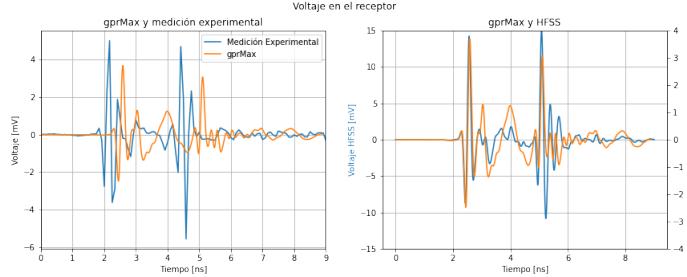


Figura 34: Resultados de las antenas PowerLOG en un escenario con arena a 42cm - Mediciones y simulaciones

Se logra observar que al comparar la medición con la simulación en gprMax, se presenta un retardo en la señal de simulación. Sin embargo, las señales presentan una amplitud similar. Por otro lado, en la comparación de gprMax y HFSS, se presenta una forma de onda muy parecida, pero la amplitud de la simulación en HFSS es un orden de magnitud mayor.

También, se simuló un escenario con resolución de 1mm y 0.5mm en gprMax. Para optimizar la memoria, las distancias entre antenas fueron de 5cm y la distancia de las antenas con la superficie de arena de 20cm. El voltaje en la antena receptora resultado de la simulación se muestra en la figura 35.

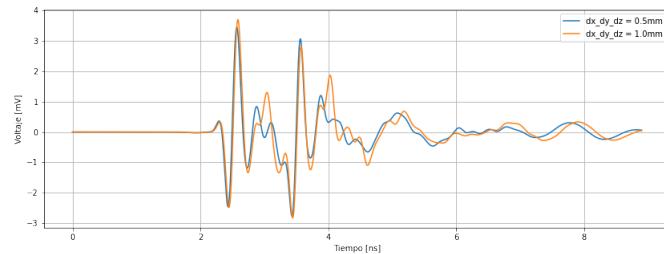


Figura 35: Escenario con arena a 20cm de las antenas - voltaje en el receptor

En la figura 35 se ven las reflexiones debidas a la arena en un tiempo menor respecto a la figura 34, ya que la arena se encuentra más cercana a las antenas. Los resultados también muestran que con resolución de 1mm ocurren oscilaciones más pronunciadas al final del pulso original que cuando se usa 0.5mm, sin embargo la forma de onda sigue siendo parecida. Finalmente, los tiempos y memoria consumidos en esta simulación se muestran en la tabla 4.

Resolución	Memoria RAM	Tiempo de simulación (hh:mm:ss)
1.0mm	32.3GB	8:54:15
0.5mm	155GB	21:33:24

Tabla 4: Tiempos y memoria en la simulación de la antena en espacio libre.

### 5.3. Escenario con arena y esfera metálica

Al escenario con la arena a 20cm de las antena se le añadió una esfera metálica de 7cm de diámetro. La esfera, de material *pec*, se encuentra enterrada a 11cm en la arena y con coordenadas en los ejes *X* y *Z* en el centro del escenario. Al simular, el voltaje en la antena receptora resulta en la gráfica de la figura 36.

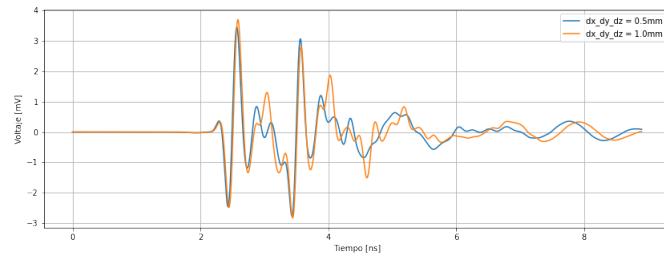


Figura 36: Escenario con arena a 20cm de las antenas y esfera enterrada 11cm - voltaje en el receptor

Si bien la señal es muy similar a la de la figura 35, a partir del nanosegundo 4 se registra una leve diferencia. Con los resultados de esta simulación se puede analizar la respuesta de la esfera. Al restar la señal de este escenario con la del escenario sin la esfera, se obtiene lo siguiente (figura 37).

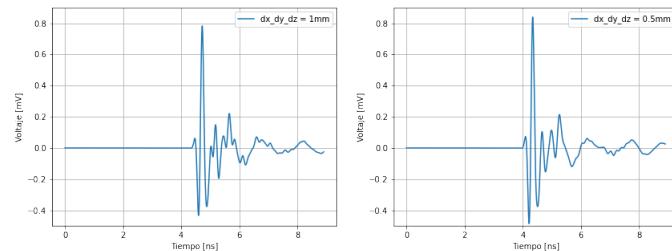


Figura 37: Escenario con arena a 20cm de las antenas restado con escenario con esfera enterrada a 11cm - voltaje en el receptor

## 5.4. Simulaciones de la antena PowerLOG usando linea de transmisión coaxial desde la frontera de absorción

En las anteriores simulaciones de la antena PowerLOG se usó una excitación que consistía en una única fuente de voltaje dentro de la antena. Esta aproximación no es cercana a la realidad, ya que esta antena es excitada con un cable coaxial en un entorno realista. Por tanto, en esta sección se mostrarán resultados obtenidos al excitar la antena PowerLOG con una línea de transmisión coaxial de impedancia  $50\Omega$ . La línea de transmisión coaxial se prolonga desde la frontera absorbente, llega a través del interior de la antena y termina en una de sus jorobas. En gprMax la fuente de excitación se colocó cerca de la frontera, alejada a 237mm del punto donde se conecta el conductor interno de la línea coaxial con la joroba de la antena. En HFSS, el puerto de excitación está en la frontera, pero se conserva la distancia que este tiene de la antena tal como está gprMax. En la figura 38 se observa un corte transversal de la antena en el espacio libre, donde se puede detallar el interior de la antena y cómo esta se conecta a la línea coaxial.

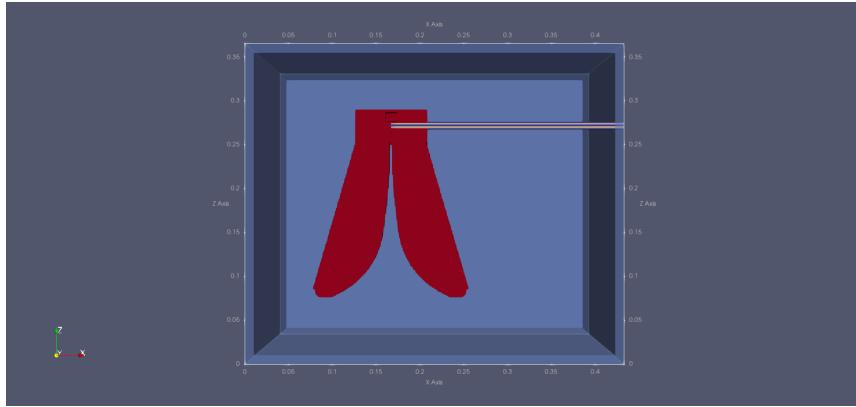


Figura 38: Vista interior de la antena PowerLOG

La antena es simulada entonces en el espacio libre, para calcular sus parámetros de dispersión. Se simuló en gprMax con resoluciones de 1.0mm y 0.5mm y se comparará con el mismo escenario simulado en HFSS. En la figura 39 se muestran los resultados obtenidos en gprMax y HFSS para el voltaje medido en el puerto de excitación.

Por otro lado, el voltaje reflejado registrado se puede ver en la figura 40.

De esta forma, se obtienen el parámetro S11 de la antena en gprMax. Para HFSS se simuló en el dominio de la frecuencia y se obtuvo el parámetro S11. En la figura 41 se muestra el resultado en cuestión.

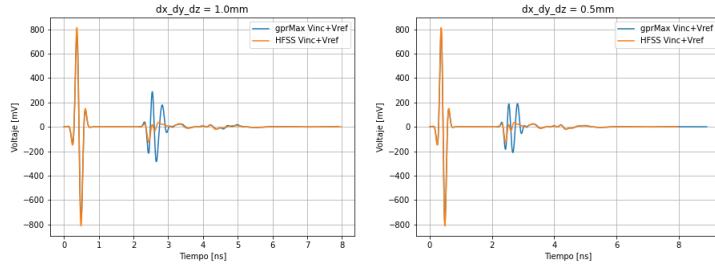


Figura 39: Voltaje medido en el puerto de excitación de la antena PowerLOG

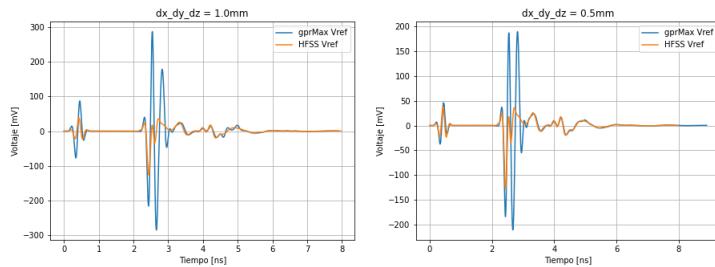


Figura 40: Voltaje reflejado en el puerto de excitación de la antena PowerLOG

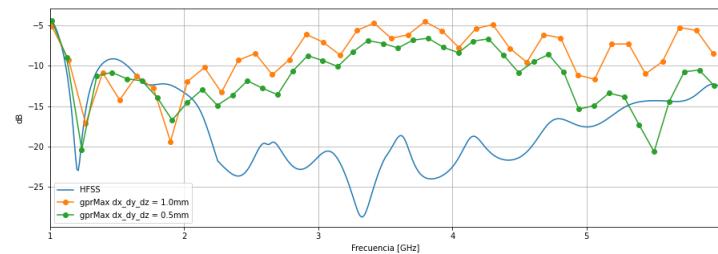


Figura 41: Parámetros S11 de la antena PowerLOG

Los anteriores resultados son muy diferentes entre sí. Se sabe que en la antena PowerLOG el rango de 1-6 GHz está dentro de su rango de operación, por lo que los resultados en HFSS son más confiables. Teniendo en cuenta que el modelo 3D de la antena en gprMax se obtuvo desde HFSS, los resultados no deberían ser tan distintos. Sin embargo, si se revisa la magnitud del campo eléctrico a diferentes distancias de la antena, se obtiene una señal muy similar. En las figuras 42, 43 y 44 se muestra el campo eléctrico a lo largo del tiempo en un punto alejado de la antena obtenido en HFSS y gprMax (simulación de resolución de 0.5mm).

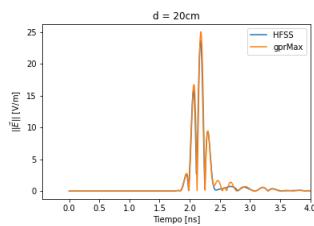


Figura 42: Magnitud del campo eléctrico a 20cm de la antena

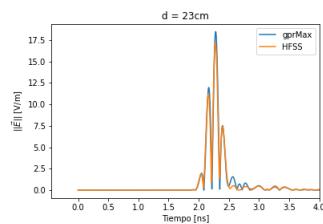


Figura 43: Magnitud del campo eléctrico a 23cm de la antena

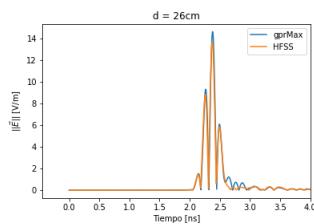


Figura 44: Magnitud del campo eléctrico a 26cm de la antena

Por último, los tiempos y memoria consumidos en las simulaciones presentadas se exponen en la tabla 5.

Simulador	Resolución	Memoria RAM	Tiempo de simulación (hh:mm:ss)
gprMax (GPU)	1.0mm	3.6GB	00:02:19
gprMax (CPU)	0.5mm	32.1GB	02:42:03
HFSS (tiempo)	-	3.32GB	05:20:10
HFSS (frecuencia)	-	2.45GB	00:39:46

Tabla 5: Tiempos y memoria en la simulación de la antena de PowerLOG en espacio libre.

## 6. Conclusiones y trabajo Futuro

Como se ha visto, por medio del programa stl-to-hdf5-gprMax es posible convertir un objeto diseñado en herramientas CAD a un objeto de gprMax, lo cual facilita el proceso de simulación al agilizar la creación de escenarios. Además, mediante este programa se demostró cómo es posible tener geometrías no implementadas en gprMax como lo fueron las antenas corneta y PowerLOG. Los resultados de simulación muestran que el programa es capaz de replicar la geometría de las antenas nativas de gprMax ya que se obtuvieron mediciones de voltaje y parámetros S11 muy similares a los documentados por gprMax.

En el software gprMax y en FDTD en general, no se suele utilizar líneas de transmisión coaxiales para la excitación de antenas, ya que en lugar de esto, se usan aproximaciones de líneas de transmisión virtuales que tienen menor costo computacional, como se explica en [3]. Sin embargo, la excitación de las antenas de bocina y PowerLOG mediante una aproximación de estas no resultan acorde a la realidad, por lo que se optó por simular con una línea de transmisión coaxial de dimensiones específicas. Las simulaciones de la antena de bocina en la sección 4 muestran que en el software gprMax pueden obtenerse resultados comparables con los de HFSS; lo cuál es una evidencia importante ya que HFSS es un software licenciado y costoso, a diferencia de gprMax que es de código abierto. Tanto los voltajes medidos en el puerto de excitación de la antena como los parámetros S11 de las simulaciones en gprMax y HFSS coinciden en el escenario simulado, así como los campos radiados por la antena, que se evidencian en los patrones de radiación. Sin embargo, al simular la antena PowerLOG, no se alcanzaron resultados tan exactos entre gprMax y HFSS como en el caso de la antena anterior. Es necesario continuar investigando el porqué de la discrepancia entre estas simulaciones en los voltajes medidos en el puerto de excitación. Dado que se obtuvieron similares campos radiados por la antena a diferentes distancias tanto en gprMax como en HFSS, resulta preciso, para un trabajo futuro, revisar el cálculo del voltaje en el puerto de excitación, así como la definición de la línea de transmisión coaxial en el escenario. Los archivos generados en las simulaciones y resultados de este documento pueden descargarse del repositorio principal del proyecto Desminado Humanitario, en la carpeta /Simulaciones/gprMax.

En general, con el software gprMax se logró crear geometrías desde un archivo CAD para definir antenas de los tipos mostrados en este informe. De esta

forma, se lograron escenarios en gprMax y HFSS con los mismos objetos para así poder comparar el desempeño de ambos simuladores. Dentro de las ventajas de gprMax está el uso de GPU lo cual acelera las simulaciones ya que estas son completadas en pocos minutos. En las simulaciones que se hicieron con CPU, el tiempo de simulación no resulta tan distinto para gprMax y HFSS, sin embargo, la memoria RAM requerida por gprMax si es mucho mayor que en HFSS. También, gprMax es de código abierto y su instalación es sencilla, se puede usar en máquinas virtuales o en servicios de *Cloud Computing*. A pesar de todo, gprMax requiere conocimientos en programación para sacar su máximo provecho ya que la obtención de resultados de simulación y construcción de escenarios no resulta sencilla como en HFSS. Es necesario entonces, lograr resultados muy similares en gprMax y HFSS, para la simulación de la antena PowerLOG y no sólo en la antena de bocina. De esta manera, se garantizarán resultados confiables en gprMax para la simulación de los escenarios estudiados en el proyecto Desminado Humanitario. Así, se pretende que personas que no tienen acceso a HFSS, puedan continuar y acceder a la investigación realizada en estas simulaciones a través del software libre de simulación gprMax.

## Referencias

- [1] A. Hajiaboli and M. Popovic, “Fdtd subcell modeling of the inner conductor of the coaxial feed: Accuracy and convergence analysis,” *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, 2007.
- [2] G. Banjeglav and K. Malarić, “2.4 ghz horn antenna,” *TRANSACTIONS ON MARITIME SCIENCE*, 2015.
- [3] R. Mäkinen, V. Kangas, J. Lahtinen, and M. Kivikoski, “A coaxial probe feed model for fdtd,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 34, no. 3, pp. 193–198, 2002. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/mop.10415>