

Estudio de modelos electromagnéticos para la obtención de mapas de humedad superficial de suelo.

Por ***Ing. Stefanía Lidia Monella***

Presentado ante la Facultad de Matemática, Astronomía y Física y el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich como parte de los requerimientos para la obtención del grado de

**MAGISTER EN APLICACIONES ESPACIALES DE ALERTA Y
RESPUESTA TEMPRANA A EMERGENCIAS**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA

Mayo, 2014

©IG - CONAE/UNC año

© FaMAF - UNC año

Director

Dr. Marc Thibeault

Comisión Nacional de Actividades Espaciales, Buenos Aires, Argentina

Co-Director

Mag. Danilo Dadamia

Comisión Nacional de Actividades Espaciales, Buenos Aires, Argentina

Resumen

En la presente tesis se estudiaron los modelos electromagnéticos Oh e IEM para la obtención de humedad superficial a suelo desnudo y se analizó el uso de un *parámetro de ajuste* dentro del modelo IEM para reducir las diferencias en estimación de humedad de suelo y rugosidad que tenía con el modelo de Oh. Se probaron dos ajustes para el modelo IEM en banda L y para la validación se utilizaron imágenes SAR del área de la región pampeana, provenientes de tres sensores: ALOS-PALSAR, SARAT y UAVSAR.

Además, se evaluó la posibilidad de aplicar los ajustes utilizados en banda L para el modelo IEM, en banda X y se estudió implementar una calibración semi-empírica del modelo IEM para banda X propuesta por Baghdadi et al. (2011).

Abstract

The aim of this research was to study the electromagnetic models Oh and IEM in order to retrieve soil moisture from bare soil. An *adjust parameter* within the IEM model was reviewed in order to reduce the existing differences with the Oh model in the soil moisture and roughness estimations. Two *adjust parameter* were studied for IEM model in L-band and for validation purpose SAR images, from the Pampean region, from three sensors: ALOS - PALSAR, SARAT and UAVSAR were used.

Furthermore, the possibility of applying in X-band the two adjusting parameters used in L- band for IEM model was analyzed along with the possibility of implemented a semi-empirical calibration for the IEM model proposed by Baghdadi et al. (2011).

Palabras Claves: Humedad del Suelo, Modelos electromagnéticos, Parámetro de ajuste para modelo IEM, Imágenes SAR.

Índice general

Resumen /Abstract	2
Lista de Figuras	6
Lista de Tablas	10
Lista de Acrónimos	11
Lista de Símbolos.....	12
1. Introducción	13
1.1 Objetivo de la Tesis	16
1.2 Alcances de la Tesis	17
1.3 Región de Estudio.....	17
2. Marco Teórico.....	19
2.1 El Concepto Radar y Sistema SAR.....	19
2.2 Geometría de Adquisición.....	21
2.3 Polarización	23
2.4 Interacción de la radiación electromagnética con la materia	24
2.5 Distorsiones Geométricas y Radiométricas.....	26
3. Factores que influyen la característica de la señal	29
3.1 Definición de Constante Dieléctrica.....	29
3.2 Constante Dieléctrica del Suelo	31
3.3 Rugosidad	33
3.3.1 Valor cuadrático medio en alturas s (Root Mean Square Height, RMS)	34
3.3.2 Longitud de Correlación l	35
3.4 Modelos para relacionar la Constante Dieléctrica con la Humedad del Suelo.....	37
3.4.1 Modelo de Topp	38
3.4.2 Modelo Semi-empírico de Perplinsky	39
3.4.3 Comparación entre Topp y Perplinsky para suelos de la Región Pampeana	40
4. Modelos de Humedad a Suelo Desnudo	42
4.1 Modelos Empíricos	42

4.2 Modelos Semi-empíricos	43
4.3 Modelos Teóricos	45
4.4 Otros enfoques para estimar humedad de suelo	48
5. Análisis de Sensibilidad de los Modelos	49
5.1 Simulaciones Modelo de Oh	49
5.2 Simulaciones Modelo IEM.....	55
6. Ajuste del Modelo IEM para Banda L	61
6.1 Simulaciones del modelo IEM	63
6.2 Ajuste IEM con $s/l=0.055$	64
6.3 Ajuste IEM con $s/l=0.08$	69
7. Validación en Imágenes SAR.....	75
7.1 Imágenes utilizadas	75
7.1.1 Imágenes ALOS-PALSAR	77
7.1.2 Imágenes SARAT.....	78
7.1.3 Imágenes UAVSAR.....	79
7.2 Procesamiento de las Imágenes.....	80
7.3 Hipótesis de Trabajo.....	81
7.4 Cálculo de Radar Vegetation Index	81
7.5 Cálculo de Mapas de Humedad de suelo y Rugosidad superficial.....	81
7.6 Extracción de Estadísticas de los mapas y comparación de resultados.....	85
7.1.1 Imágenes ALOS-PALSAR	85
7.1.2 Imágenes SARAT.....	89
7.1.3 Imágenes UAVSAR.....	90
8. Estudio de los Modelos en Banda X: Análisis de Sensibilidad y Ajuste del modelo IEM	92
8.1 Sensibilidad Modelo Oh en banda X	93
8.2 Sensibilidad Modelo IEM para banda X	96
8.3 Ajuste Modelo IEM para banda X.....	100
8.4 Modelo de Baghdadi	104
8.5 Relación entre IEM y OH comparando modelo lineal y de Baghdadi	106

9. Conclusiones	111
Bibliografía	115
Anexo	121
A. Fórmula de Deybe.....	121
B. Misiones SAR.....	122
B.1 Misión ALOS-PALSAR.....	122
B.2 Misión SARAT	124
B.3 Misión UAVSAR.....	125

Lista de figuras

Figura 1: Región Pampeana en rojo, mosaico Landsat.....	17
Figura 2: Espectro Electromagnético	19
Figura 3: Esquema de una antena de apertura sintética.....	21
Figura 4: Esquema de adquisición de imágenes de un SAR	22
Figura 5: Componentes de una Onda Electromagnética	23
Figura 6: Polarización de la Onda Electromagnética	24
Figura 7: Penetración del pulso de radar en las bandas X, C y L	25
Figura 8: Mecanismos de retrodispersión	26
Figura 9: Distorsiones geométricas debido a la topografía del terreno	27
Figura 10: Constante dieléctrica como función de la humedad volumétrica del suelo para cinco suelos con diferente composición granulométrica a 1,4 GHz.	32
Figura 11: Triángulo de textura USDA, clases texturales del suelo convencionales basados en porcentaje de arcilla (por debajo de 0.002 mm), limo (0,002 hasta 0,05), y la arena (0,05-2,0).....	33
Figura 12: Ejemplo de condiciones de campo y rugosidad para distintos tipos de coberturas.....	34
Figura 13: Comparación funciones de autocorrelación exponencial y gaussiana	35
Figura 14: Retrodispersión de la superficie en función de su rugosidad.....	37
Figura 15: Simulación de los modelos Perplinsky y Topp para diferentes tipos de suelos del área pampeana	41
Figura 16: Región de validez en el espacio k_l , k_s (espacio de longitudes de correlación y alturas rms) de los modelos directos.....	46
Figura 17: Simulación modelo de OH para banda L, ángulo de incidencia 20° y $l=20$ cm, a) σ_{HH}° vs. Mv b) σ_{VV}° vs. Mv	51
Figura 18: Simulación modelo de OH para banda L y ángulo de incidencia 30° y $l=20$ cm, a) σ_{HH}° vs. Mv σ_{VV}° vs. Mv	51
Figura 19: Simulación modelo de OH para banda L y ángulo de incidencia 20° , (a) σ_{HH}° vs. Rugosidad (b) σ_{VV}° vs. Rugosidad.....	52
Figura 20: Simulación modelo de OH para banda L y ángulo de incidencia 30° , (a) σ_{HH}° vs. Rugosidad (b) σ_{VV}° vs. Rugosidad.....	52
Figura 21: Simulación modelo de OH banda L con ángulo de incidencia variable y altura rsm fija de $s=0.5$ cm. y $s=3.5$ cm.	53
Figura 22: Simulación 3D del modelo de OH banda L para ángulo de incidencia de 20° y polarización HH.....	54
Figura 23: Simulación 3D del modelo de OH banda L para ángulo de incidencia de 30° y polarización VV	54
Figura 24: Simulación modelo IEM para banda L, ángulo de incidencia 20° y $l=20$ cm, (a) σ_{HH}° vs. Mv (b) σ_{VV}° vs. Mv	55

Figura 25: Simulación modelo IEM para banda L, ángulo de incidencia 30°, y l= 20 cm, (a) σ_{HH}° vs. Rugosidad (b) σ_{VV}° vs. Rugosidad.	56
Figura 26: Simulación modelo IEM banda L con ángulo de incidencia variable, l= 20 cm y altura rsm fija de s= 0.5 cm. y s=3.5 cm.	57
Figura 27: Simulación 3D del modelo de OH banda L para ángulo de incidencia de 20°, l= 20 cm y polarización HH 57	57
Figura 28: Simulación 3D del modelo de OH banda L para ángulo de incidencia de 30°, l= 20 cm y polarización VV. 58	58
Figura 29: Curvas funcionales modelos Oh e IEM, σ_{HH}° vs Mv (%) para 3 niveles de rugosidad y ángulo de incidencia de 30°. 59	59
Figura 30: Curvas Funcionales modelos Oh e IEM, σ_{VV}° vs Mv (%) para 3 niveles de rugosidad y ángulo de incidencia de 30°. 59	59
Figura 31: Curvas funcionales modelos Oh e IEM, σ_{HH}° vs rugosidad (cm) para 3 niveles de humedad superficial y ángulo de incidencia de 20°. 60	60
Figura 32: Curvas Funcionales modelos Oh e IEM, σ_{VV}° vs rugosidad (cm) para 3 niveles de humedad superficial y ángulo de incidencia de 20°. 60	60
Figura 33: Diferencia absoluta, en decibles, entre el modelo Oh e IEM, para polarización HH y ángulos variables entre 18° y 36°. 63	63
Figura 34: Variación σ_{hh}° con el ángulo de incidencia para s/l, para función autocorrelación exponencial (izq.) y función de autocorrelación gausseana 64	64
Figura 35: Curvas funcionales modelos Oh e IEM con s/l=0.055, σ_{HH}° vs. Mv (%) para 3 niveles de rugosidad. 66	66
Figura 36: Curvas Funcionales modelos Oh e IEM con s/l=0.055, σ_{VV}° vs. Mv (%) para 3 niveles de rugosidad. 66	66
Figura 37: Curvas funcionales modelos Oh e IEM con s/l=0.055, σ_{HH}° vs s (cm.) para 3 niveles de humedad superficial. 67	67
Figura 38: Curvas Funcionales modelos Oh e IEM con s/l=0.055, σ_{VV}° vs s (cm) para 3 niveles de rugosidad. 67	67
Figura 39: Simulaciones 3D de modelos Oh e IEM con s/l=0.055, para ángulo de incidencia de 18°. 68	68
Figura 40: Simulaciones 3D de modelos Oh e IEM con s/l=0.055, para ángulo de incidencia de 36°. 68	68
Figura 41: Simulaciones 3D de modelos Oh e IEM con s/l=0.055, para ángulo de incidencia de 50°. 69	69
Figura 42: Curvas funcionales modelos Oh e IEM con s/l=0.08, σ_{VV}° vs. Mv (%) para 3 niveles de rugosidad. 71	71
Figura 43: Curvas Funcionales modelos Oh e IEM con s/l=0.08, σ_{HH}° vs. Mv (%) para 3 niveles de rugosidad. 71	71

Figura 44: Curvas funcionales modelos Oh e IEM con $s/l=0.08$, σ_{VV}° vs s (cm.) para 3 niveles de humedad superficial.	72
Figura 45: Curvas funcionales modelos Oh e IEM con $s/l=0.08$, σ_{HH}° vs s (cm.) para 3 niveles de humedad superficial.	72
Figura 46: Simulaciones 3D de modelos Oh e IEM con $s/l=0.08$, para ángulo de incidencia de 18°	73
Figura 47: Simulaciones 3D de modelos Oh e IEM con $s/l=0.08$, para ángulo de incidencia de 36°	73
Figura 48: Simulaciones 3D de modelos Oh e IEM con $s/l=0.08$, para ángulo de incidencia de 50°	74
Figura 49: Áreas de estudio imágenes ALOS-PALSAR.....	76
Figura 50: Áreas de estudio imágenes SARAT	76
Figura 51: Áreas de estudio imágenes UAVSAR	77
Figura 52: Ejemplo de una Look Up Table (LUT).....	82
Figura 53: Diagrama de flujo del procedimiento implementado para obtención de mapas de humedad y rugosidad	83
Figura 54: Mapa de Humedad de Suelo (%) Prov. Buenos Aires, Modelo IEM ajuste $s/l=0.08$, ALOS PALSAR.....	84
Figura 55: Mapa de Humedad de Suelo (%) Prov. Córdoba, Modelo OH, SARAT.	84
Figura 56: Mapa de Rugosidad Superficial del suelo (cm), Prov. Córdoba, Modelo IEM ajuste $s/l=0.055$, UAVSAR.	84
Figura 57: Estimación de humedad de suelo (%) para áreas de interés seleccionadas; imagen de la Prov. de Entre Ríos.	87
Figura 58: Estimación de rugosidad superficial de suelo (cm) para áreas de interés seleccionadas; imagen de la Prov. de La Pampa.	87
Figura 59: Estimación de humedad de suelo (%), imágenes ALOS PALSAR: (a) Modelo OH vs Modelo IEM ajuste $s/l=0.055$, (b) Modelo OH vs Modelo IEM ajuste $s/l=0.08$	88
Figura 60: Regresión lineal del conjunto de datos de estimaciones de humedad de suelo (%), imágenes ALOS PALSAR: (a) Modelo OH vs Modelo IEM ajuste $s/l=0.055$, (b) Modelo OH vs Modelo IEM ajuste $s/l=0.08$	89
Figura 61: Estimación de humedad de suelo (%), imágenes SARAT: (a) Modelo OH vs Modelo IEM ajuste $s/l=0.055$, (b) Modelo OH vs Modelo IEM ajuste $s/l=0.08$	90
Figura 62: Estimación de humedad de suelo (%), imágenes UAVSAR: (a) Modelo OH vs Modelo IEM ajuste $s/l=0.055$, (b) Modelo OH vs Modelo IEM ajuste $s/l=0.08$	91
Figura 63: Simulación modelo de OH para banda X y ángulo de incidencia 20° , σ_{HH}° vs. rugosidad superficial.....	94
Figura 64: Simulación modelo de OH para banda X y ángulo de incidencia 20° , σ_{VV}° vs. humedad superficial.	94
Figura 65: Simulación 3D del modelo de Oh banda X para ángulo de incidencia de 20° y polarización HH.....	95
Figura 66: Sensibilidad del coeficiente de retrodispersión con la rugosidad para suelo desnudo	95

Figura 67: Simulación modelo IEM para banda X, $l= 20$ cm y ángulo de incidencia 20° , σ_{VV}° vs. rugosidad superficial.	97
Figura 68: Simulación modelo IEM para banda X y ángulo de incidencia 20° , σ_{HH}° vs. humedad superficial.	98
Figura 69: Simulación 3D del modelo IEM banda X para ángulo de incidencia de 20° y polarización HH.	98
Figura 70: Simulación modelo IEM para banda X y ángulo de incidencia 20° , σ_{HH}° vs. humedad superficial.	99
Figura 71: Simulación modelo IEM para banda X y ángulo de incidencia 20° , σ_{HH}° vs. rugosidad superficial.	100
Figura 72: Simulación modelo IEM $s/l=0.055$: banda X, ángulo de incidencia 20° , σ_{HH}° vs. rugosidad superficial.	101
Figura 73: Simulación modelo IEM $s/l=0.08$: banda X, ángulo de incidencia 20° , σ_{HH}° vs. rugosidad superficial.	102
Figura 74: Simulación modelo IEM $s/l=0.055$: banda X, ángulo de incidencia 40° , σ_{HH}° vs. rugosidad superficial.	102
Figura 75: Simulación modelo IEM $s/l=0.08$: banda X, ángulo de incidencia 40° , σ_{HH}° vs. rugosidad superficial.	103
Figura 76: Simulación modelo de IEM con $s/l=0.325$: banda X, ángulo de incidencia 30° , σ_{HH}° vs. rugosidad superficial.	104
Figura 77: Simulación modelo IEM en banda X con calibración semi-empírica de Baghdadi para ángulo de incidencia de 20° , a) σ_{HH}° vs. rugosidad superficial b) σ_{VV}° vs. rugosidad superficial.	105
Figura 78: Simulación modelo IEM en banda X con calibración semi-empírica de Baghdadi para ángulo de incidencia de 20° , a) σ_{HH}° vs. rugosidad superficial b) σ_{VV}° vs. rugosidad superficial.	105
Figura 79: Coeficiente de retrodispersión (σ_{HH}°) vs humedad del suelo, comparación de simulaciones entre modelo de OH y modelo IEM con correlación Gaussiana y ajuste propuesto por Baghdadi et al. (2011).	106
Figura 80: Coeficiente de retrodispersión (σ_{VV}°) vs humedad del suelo, comparación de simulaciones entre modelo de OH y modelo IEM con correlación Gaussiana y ajuste propuesto por Baghdadi por Baghdadi et al. (2011).	107
Figura 81: Coeficiente de retrodispersión (σ_{VV}°) vs humedad del suelo, comparación entre simulaciones modelo de OH y modelo IEM con correlación exponencial y $s/l=0.055$	107
Figura 82: Coeficiente de retrodispersión (σ_{HH}°) vs humedad del suelo, comparación simulaciones modelo de OH, modelo IEM con correlación exponencial y $s/l=0.055$	108

Lista de Tablas

Tabla 1: Ventajas y Desventajas comparativas de Filtros.....	28
Tabla 2: Tabla con valores característicos de constante dieléctrica (ϵ) y conductividad (σ)	31
Tabla 3: Valores característicos de s	34
Tabla 4: Criterios para establecer el grado de rugosidad.....	36
Tabla 5: Proporciones de componentes de suelo utilizados para la simulación de los modelos Topp y Perplinsky.	40
Tabla 6: Cuadro resumen Modelos Electromagnéticos.....	48
Tabla 7: Rangos Dinámicos Modelo de Oh y Modelo IEM en Banda L.....	58
Tabla 8: Rangos Dinámicos Modelo de Oh y Modelo IEM con ajuste $s/l= 0.055$ en Banda L.....	64
Tabla 9: Promedio Diferencia Absoluta entre Modelo OH y Modelo IEM con ajuste $s/l=0.055$	65
Tabla 10: Rangos Dinámicos Modelo de Oh y Modelo IEM con ajuste $s/l= 0.08$, en Banda L.....	69
Tabla 11: Promedio Diferencia Absoluta entre Modelo OH y Modelo IEM con ajuste $s/l=0.08$	70
Tabla 12: Imágenes ALOS PALSAR usadas para el análisis.....	78
Tabla 13: Imágenes SARAT usadas para el análisis.....	79
Tabla 14: Imágenes UAVSAR usadas para el análisis.....	79
Tabla 15: Tamaño promedio del área de interés seleccionado para cada provincia	85
Tabla 16: Estimaciones de Humedad de Suelo, diferencia media absoluta entre los modelos, imágenes ALOS-PALSAR.	86
Tabla 17: Estimaciones de Rugosidad superficial de Suelo, diferencia media absoluta entre los modelos, imágenes ALOS-PALSAR.....	86
Tabla 18: Estimaciones de Humedad de Suelo y Rugosidad superficial de Suelo, diferencia media absoluta entre los modelos, imágenes SARAT.	89
Tabla 19: Estimaciones de Humedad de Suelo y Rugosidad superficial de Suelo, diferencia media absoluta entre los modelos, imágenes UAVSAR.	91
Tabla 20: Rangos Dinámicos Modelo de Oh en Banda X.....	96
Tabla 21: Promedio de Diferencia Absoluta entre el modelo de Oh y el modelo IEM con correlación gaussiana.	109
Tabla 22: Promedio de Diferencia Absoluta entre el modelo de Oh y el modelo IEM con correlación exponencial $s/l=0.055$	110

Lista de Acrónimos

- ALOS** Advance Land Observing Satellite
ACF Función de Autocorrelación.
CONAE Comisión Nacional de Actividades Espaciales.
JAXA Agencia Japonesa de Exploración Espacial
LUT Look Up Table.
NASA Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio de los Estados Unidos
Radar Radio Detection and Ranging.
RAR Radar de Apertura Real.
RVI Radar Vegetation Index.
SAOCOM Satélite Argentino de Observación con Microondas.
SAR Radar de Apertura Sintética
SARAT SAR aerotransportado
SIASGE Sistema Ítalo Argentino de Satélites para beneficio de la sociedad, Gestión de Emergencias y desarrollo económico
SLAR Radar Aerotransportado de Visión Lateral
TDR Time Domain Reflectometry
UAVSAR Uninhabited Aerial Vehicle Synthetic Aperture Radar

Lista de Símbolos

- M_v Contenido volumétrico de humedad de suelo.
- λ Longitud de onda.
- A Amplitud.
- f Frecuencia.
- θ Ángulo de incidencia.
- ϵ Permitividad eléctrica absoluta.
- ϵ_0 Permitividad eléctrica del vacío.
- ϵ_r Permitividad eléctrica relativa del material.
- ϵ' Constante dieléctrica (parte real de la permitividad eléctrica).
- ϵ'' Factor de pérdidas (parte imaginaria de la permitividad eléctrica).
- σ° Coeficiente de retrodispersión.
- s Valor cuadrático medio en alturas s (Root Mean Square Height, RMS).
- l Longitud de correlación.
- K_a Permitividad aparente medida por TDR.
- S Fracción de arena.
- C Fracción de arcilla.
- ρ_s Densidad de las partículas del suelo.
- ρ_b Densidad de las partículas del suelo.
- ϵ'_{fw} Parte real de la permitividad eléctrica del agua libre.
- ϵ''_{fw} Parte imaginaria de la permitividad eléctrica del agua libre.
- σ_{eff} Conductividad efectiva.
- k número de onda.
- μ_r Permitividad magnética.
- R_h, R_v Coeficientes de Fresnel.
- W^n Espectro de rugosidad de la superficie.

1. Introducción

Un elemento clave para entender la naturaleza del cambio global es la capacidad de modelar interacciones bidireccionales entre la tierra y la atmósfera. Quizás el papel más importante que la superficie de la tierra realiza es la división de energía radiante entrante en flujos de calor sensible y latente (Dubois et al, 1995).

La humedad superficial del suelo no sólo determina la distribución de la radiación solar incidente en flujo de calor sensible o de calor latente, sino que también establece la distribución de la precipitación en escorrentía superficial o infiltración. También es un factor determinante en el crecimiento y desarrollo de los cultivos, y de las plantas en general, puesto que determina el contenido de agua disponible en la parte superior del suelo donde se desarrollan las raíces de la mayoría de los cultivos en sus estados iniciales. A gran escala interviene en los procesos meteorológicos y climáticos puesto que influye en la tasa de evaporación que dará lugar a las nubes y además ejerce un efecto suavizador del clima, similar al de los mares pero de menor intensidad. A escalas medias determina en gran medida los procesos hidrológicos y agronómicos como la generación de escorrentía, la evapotranspiración, el desarrollo de los cultivos o las necesidades de riego. También controla procesos de erosión como la generación de cárcavas, los deslizamientos o movimientos en masa. Y a pequeñas escalas influye en procesos bioquímicos como el movimiento de solutos en el suelo y por ende en la calidad de las aguas (Álvarez-Mozos et al., 2005).

Se entiende como humedad superficial del suelo (M_v) al agua que se encuentra en los primeros 10 cm del suelo, mientras que el agua que está disponible para las plantas se considera que se encuentra entre los primeros 200 cm del suelo. En comparación con la cantidad total de agua en la escala global, esta delgada capa de agua en el suelo puede parecer insignificante, sin embargo, es de fundamental importancia para muchos de los procesos hidrológicos, biológicos, meteorológicos y biogeoquímicos. Sólo a nivel productivo, el impacto socio económico para países con fuerte desarrollo agropecuario como la Argentina, medir esta variable de forma periódica y sistemática, proporcionaría un parámetro fundamental en la toma de decisiones por parte de los productores agropecuarios al momento de fertilizar, irrigar o sembrar sus campos.

La observación directa de la humedad del suelo a menudo es algo difícil de medir con precisión tanto en el tiempo y como en el espacio, sobre todo a grandes escalas. La

humedad del suelo exhibe una alta variabilidad espacial tanto en pequeña como gran escala, debido a la variabilidad de las precipitaciones y la heterogeneidad de la superficie terrestre (vegetación, propiedades físicas del suelo, topografía, etc.). Mientras que el muestreo in situ de la humedad del suelo está pensado para ser lo más preciso posible, tales observaciones son sólo representativas de un área relativamente pequeña que rodea el lugar de la muestra. Promediar varias mediciones puntuales en un área grande, especialmente a escalas de 10 km, a menudo puede introducir grandes errores (Engman, 1991).

En este contexto, las imágenes satelitales son una poderosa herramienta que puede proporcionar datos espaciales precisos y repetitivos. El uso de la Teledetección para el estudio de humedad de suelo comenzó en la década del 70' poco después de la oleada en desarrollo de satélites y los esfuerzos en investigación van desde intentar estimar este parámetro a partir de imágenes ópticas hasta el uso de imágenes captadas por sensores radar.

La observación mediante sensores activos de microondas posee el interés de que su desempeño es independiente de la iluminación solar y en el rango de las microondas existen ventanas de medición que no se ven afectadas por la presencia de nubes. La emisión y retrodispersión de microondas por la superficie del suelo depende de varios factores, uno de los más importantes es la constante dieléctrica (ϵ) que está directamente relacionada con su contenido de humedad. Los detalles de esta relación son expuestos en el capítulo 3, sección 3.2.

La estimación de humedad de suelo a partir de imágenes de Radares de Apertura Sintética (SAR) no resulta tarea sencilla, dado que existen otros factores además de la constante dieléctrica, que influyen en el coeficiente de retrodispersión observado por los sensores. La rugosidad superficial (expresada estadísticamente en términos del valor cuadrático medio en alturas, la longitud de correlación y la función de autocorrelación), la textura del suelo, el relieve o la presencia de vegetación son parámetros que intervienen también en la retrodispersión y dificultan la estimación de humedad superficial de suelo. En condiciones de suelo desnudo, es decir aquel suelo donde la vegetación del suelo es escasa o nula, la rugosidad es el otro parámetro que junto con la constante dieléctrica mayor influyen en el coeficiente de retrodispersión.

Altese et al. (1996) estudiaron la sensibilidad de la señal de radar de varios parámetros de la superficie de la tierra y encontraron que el parámetro que más influye es la rugosidad de la superficie. El efecto de la rugosidad de la superficie a menudo puede ser igual o mayor que los efectos del contenido de humedad del suelo sobre la retrodispersión y por lo tanto, la determinación de los parámetros de rugosidad y la separación de su contribución a la retrodispersión total es quizás uno de los aspectos más difíciles a la hora de estimar la humedad del suelo utilizando imágenes SAR. Los detalles de esta variable son expuestos en el capítulo 3, sección 3.3.

Dado que los parámetros de las superficies naturales (humedad de suelo y rugosidad superficial) no pueden ser controlados, muchos estudios se ha centrado en encontrar la mejor configuración de los parámetros del sensor del radar para una óptima estimación de la humedad superficial del suelo (Barret et al., 2009). Ulaby et al. (1986) recomendó el uso de longitudes de onda más largas (banda L) con ángulos de incidencia bajos para poder reducir al mínimo el efecto de la vegetación, en caso de estar presente y la rugosidad de la superficie. Rao et al. (1993) encontró que mediciones del coeficiente de retrodispersión en multi-frecuencias proveen mejores estimaciones del parámetro humedad de suelo que aquellas derivadas de una sola frecuencia. A su vez, Holah et al. (2005) afirma que ángulos de incidencia bajos a medios son óptimos para la estimación de humedad de suelo y que la polarización HH resulta más sensible que la polarización cruzada HV, pero a su vez es menos sensible que la VV. El uso de múltiples polarizaciones debería, en teoría, mejorar las estimaciones. Sin embargo, algunos estudios no están de acuerdo con esto, Baghdadi et al. (2006) llegaron a la conclusión de que la precisión de las estimaciones de humedad del suelo no mejoró cuando se utilizan dos polarizaciones (HH y HV) en lugar de una sola. Sin embargo, el consenso general de la literatura es que los ángulos de incidencia bajos, las longitudes de onda largas (banda L) y ya sea polarización HH o HV son los parámetros del sensor relevantes para la estimación de la humedad del suelo (Barret et al., 2009).

Actualmente la mayoría de los sistemas SAR a bordo de satélites (RADARSAT-2, Sentinel-1, COSMO Skymed, TerraSAR-X) operan en bandas C y X, las cuales no son las más adecuadas para la estimación de la humedad del suelo. Si bien algunos estudios preliminares indican la factibilidad para estimar humedad de suelo utilizando este tipo de sensores, trabajar con longitudes de ondas cortas vegetal implica una mayor contribución al coeficiente de retrodispersión por parte de la rugosidad del terreno y por la vegetación (en caso de estar presente). Por el momento no existen misiones satelitales en órbita operando en banda L, el satélite ALOS de la Agencia Japonesa de Exploración Espacial (JAXA), con su sensor de microondas PALSAR, no funciona desde Mayo de 2011 y el satélite Daichi-2 (ALOS-2) fue lanzado en Mayo 2014, por lo que la JAXA estima que a partir de Noviembre habrá datos disponibles para trabajar¹. Para el futuro cercano, se espera contar con datos de las misiones planificadas en banda L, como son la misión SAOCOM 1A y 1B de Argentina, cuyo primer lanzamiento se espera entre 2014-2015 y el satélite activo/pasivo SMAP de la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio de los Estados Unidos (NASA), esperado para el año 2015.

Las metodologías existentes para relacionar el contenido volumétrico de humedad de suelo con el coeficiente de retrodispersión pueden agruparse en tres categorías. En primer lugar están aquellos modelos que intentan relacionar σ° y M_v mediante regresiones lineales simples, las cuales sólo son válidas para condiciones invariables de rugosidad de suelo y parámetros de adquisición de las imágenes. Una segunda categoría incluye las técnicas de detección de cambios para analizar variaciones de M_v , basados en

¹ <http://global.jaxa.jp/projects/sat/alos2/topics.html#topics2664>

que la rugosidad superficial, la textura del suelo o la cobertura vegetal cambian más lentamente que la humedad del suelo (Engman, 1991). La última categoría incluye modelos de dispersión electromagnética que simulan el proceso de retrodispersión de la superficie terrestre, para suelo con ausencia de vegetación se han desarrollado tanto modelos empíricos el Modelo de Dubois et al. (1995), modelos de base física como el modelo Integral Equation Method (IEM) desarrollado por Fung et al. 1992 y modelos semi-empíricos como el Modelo de Oh et al. (2004). Los detalles de estos modelos son expuestos en el capítulo 4.

En el marco del Plan Nacional Espacial, la CONAE desarrolla el proyecto SAOCOM² que constituye un sistema de observación de la Tierra, dedicado al aprovechamiento de los datos de teleobservación para la optimización de actividades socio-económicas y estudios científicos. SAOCOM será una constelación formada por dos satélites (SAOCOM 1A y 1B) que a su vez pasara a conformar el Sistema Ítalo Argentino de Satélites para beneficio de la sociedad, Gestión de Emergencias y desarrollo económico (SIASGE) junto con cuatro satélites italianos COSMO SkyMed.

Una de los principales objetivos de SAOCOM será determinar la humedad superficial del suelo, mediante el uso de información SAR polarimétrica en banda L y que dicha información sea utilizada en el desarrollo de aplicaciones agrícolas e hidrológicas. Es una misión de cobertura global y la región pampeana, que comprende las provincias de Buenos Aires, Córdoba, Entre Ríos, La Pampa y Santa Fe, es donde se pondrán a punto los modelos de humedad de suelo.

1.1. Objetivo de la Tesis

El objetivo de esta tesis es lograr mediante la parametrización de la razón entre la rugosidad y la longitud de correlación del suelo, el acople de modelos semi-empíricos y teóricos. Mediante esta parametrización se pretende que ambos tipos de modelos estimen valores de humedad de suelo similares, minimizando el error, dentro del rango de validez de sus variables independiente.

Para lograr este objetivo en los tiempos fijados, se elegirá dos modelos en particulares Oh e IEM y se limitará a una o dos las función de autocorrelación a considerar.

² <http://www.conae.gov.ar/satelites/saocom.html>

1.2. Alcances de la tesis

En base al objetivo de esta tesis, se pretende aplicar esta parametrización en dos longitudes de onda bien diferenciadas banda-L y X, con el fin de poder combinar estos modelos y ver la relación obtenida con las longitudes de correlación.

1.3. Región de Estudio

La región de estudio de la presente tesis es la región pampeana, abarcadora de las provincias de Buenos Aires, La Pampa, Santa Fe, Córdoba y Entre Ríos, siendo la principal zona de tierras de cultivo de la Argentina, con aproximadamente 83 millones de hectáreas.

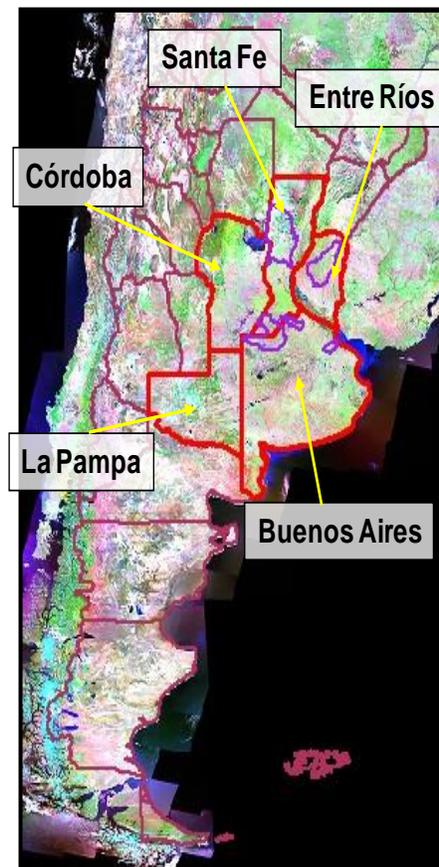


Figura 1: Región Pampeana en rojo, mosaico Landsat (Dadamia, 2009)

Su relieve es de llano a ligeramente ondulado, presenta una suave pendiente hacia el Este-Sudeste. La temperatura media anual es de 17 a 18 ° C en el norte y 14 ° C en el sur. La precipitación media anual varía desde 500 hasta 600 mm en el suroeste a más de

1.000 mm en el noreste, concentradas principalmente entre diciembre y marzo, siendo julio y agosto los meses más secos (Hall, et al., 1992)

Es la región más importante del territorio argentino, desde el punto de vista económico ya que por sus características de clima y suelo la transforman en una zona agrícola y ganadera por excelencia³. En cuanto a las áreas de cultivo, los principales cultivos son la soja, el trigo, el maíz y el girasol, en ese orden de importancia. Los cultivos secundarios son sorgo, cebada, maní y lino.

³ http://www.mininterior.gov.ar/municipios/gestion/regiones_archivos/Pampeana.pdf

2. Marco Teórico

2.1. El Concepto Radar y Sistema SAR

El Radar (*Radio Detection And Ranging*) es un sistema activo que emite energía y recibe el eco que regresa de los objetos reflejados, lo que permite detectar y localizar elementos en la superficie terrestre. El Radar es un radiómetro de micro-ondas, que trabaja en la región del espectro electromagnético con longitudes de onda entre 1 mm y 100 cm (CCRS, 2001) constituyendo las longitudes de onda más amplias utilizadas en teledetección (Fig. 2).

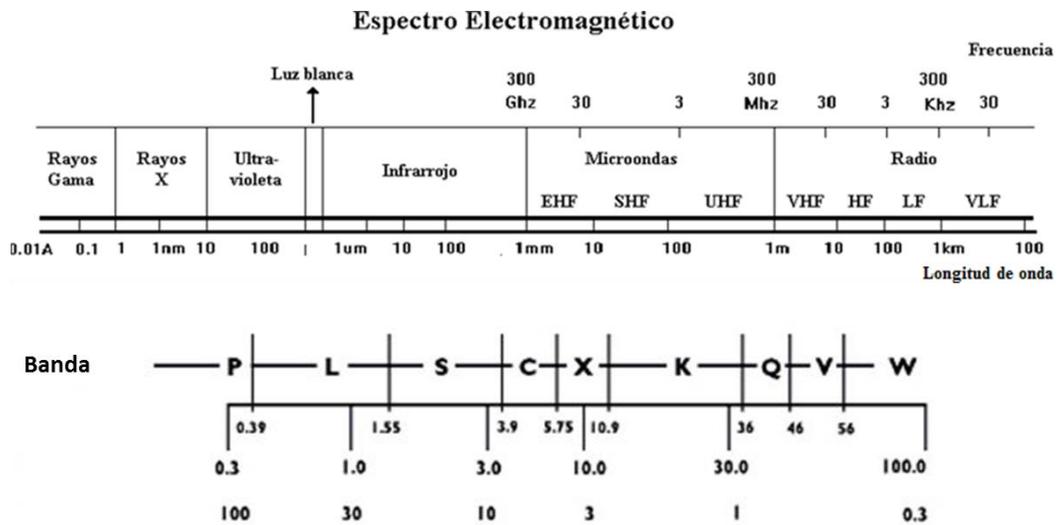


Figura 2: Espectro Electromagnético

La frecuencia de las microondas se clasifica en bandas identificadas por letras. Las que se emplean más comúnmente en radares son:

- Banda X: TerraSAR-X, COSMO-SkyMed
- Banda C: RADARSAT-1/2, Sentinel-1, ERS-1/2 SAR, RISAT-1
- Banda S: Almaz-1
- Banda L: JERS-1 SAR, ALOS-PALSAR, SAOCOM, ALOS2, SARAT, UAVSAR
- Banda P: AIRSAR, AIRMOSS

En particular, un sistema activo es capaz de transmitir un pulso corto en una dirección específica, en contraposición con un sistema pasivo, que utiliza la energía emitida desde la superficie de la tierra como fuente primaria de energía. La magnitud física medida es la intensidad de la radiación, determinada a partir de la distancia al objetivo (target) y del tiempo transcurrido entre la emisión del pulso y la detección del blanco.

El desarrollo del radar comenzó en los 40's en la Segunda Guerra Mundial, usado como dispositivo en el aire y en el mar para la detección de las fuerzas enemigas (Lopinto, 2012). Uno de los primeros sistemas fue el Radar de Apertura Real (RAR), cuya resolución espacial estaba limitada por el tamaño de la antena utilizada, mientras más grande sea la antena mejor será la resolución espacial (SARMAP, 2008). El radar areotransportado de visión lateral (SLAR), mostró una gran versatilidad en fotografía aérea al evitar la recepción de información ambigua desde dos blancos a la misma distancia en nadir. Sin embargo este sistema seguía teniendo el problema de baja resolución espacial.

La resolución en rango se determina por las características de la señal del radar a lo largo de la trayectoria entre el sensor y la superficie iluminada, y depende de la longitud del pulso transmitido (λ) (CCRS, 2001). Un pulso corto proporciona mejor resolución pero mientras más corto sea ese pulso, más baja será la energía transmitida y más pobre la resolución radiométrica. Para evitar esto los radares de antena de apertura sintética (SAR) generan un pulso amplio con una modulación de frecuencia lineal conocido como "chirp" (SARMAP, 2008). El enviar una señal chirp y procesar el eco de retorno mediante un filtro adaptado (*matched filter*) son las principales ideas en la construcción de una imagen de radar (Lopinto, 2012).

Los sistemas SAR logran mejorar la resolución espacial de las imágenes gracias a que aprovechan el movimiento del satélite, sumado a técnicas de procesamiento, para simular una antena de mayor porte (Fig. 3). La principal idea de estos sistemas es simular una antena equivalente a una del sistema SLAR, pero de tamaño mucho menor. Esto es posible aprovechando la variación en el corrimiento Doppler de los ecos generados por un mismo blanco durante el tiempo observado. De esta forma se puede obtener una fina resolución en la dirección de acimut (en la dirección de vuelo), del orden de la resolución que se obtiene en la dirección de rango (Henderson y Lewis, 1998).

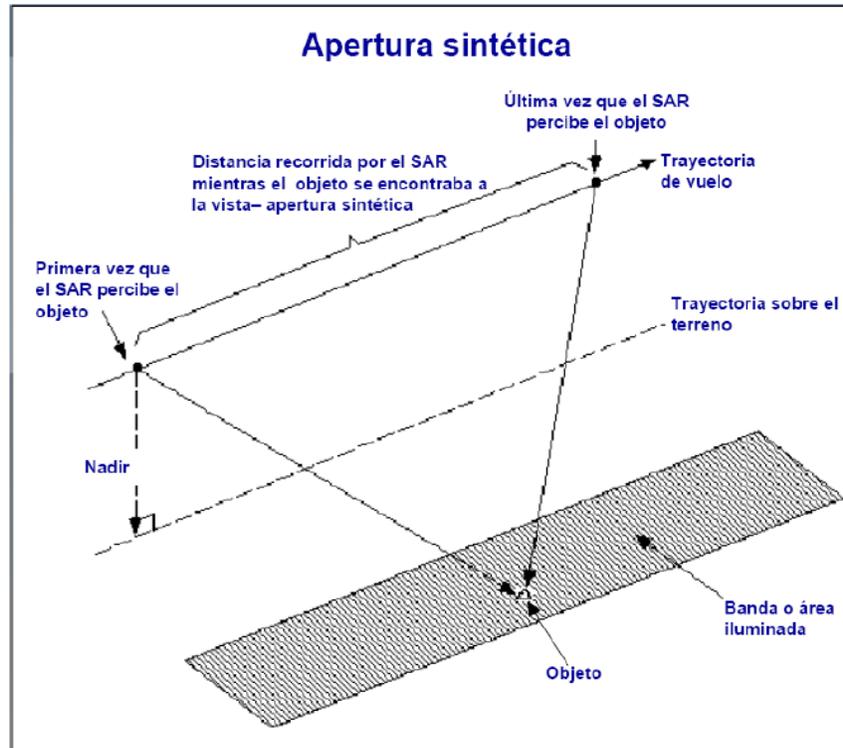


Figura 3: Esquema de una antena de apertura sintética (CCRS, 2001)

La apertura sintética es la distancia recorrida por el satélite mientras la antena toma información acerca del objeto. La misma antena transmite pulsos con una cierta frecuencia de repetición (pulse repetition frequency, PRF) y recibe los ecos (Karszenbaum, 2007).

2.2. Geometría de Adquisición

La figura 4 esquematiza la geometría de adquisición de imágenes de un sistema SAR monostático, es decir que el transmisor y receptor se encuentran en la misma plataforma. La dirección de avance del satélite es también llamada dirección de *acimut* y la dirección de observación es denominada *rango oblicuo* (*slant range*). El rango determina la distancia existente entre el sensor y el blanco, así la distancia más cercana a la que se encuentran los blancos iluminados es denominada *rango cercano*, mientras que la mayor distancia es denominada *rango lejano*.

El área de la superficie de la tierra que es iluminado por el SAR se lo conoce como *pisada del satélite* (*footprint*) y el ancho de dicha superficie es llamado *ancho de barrido* (*swath*) y está determinado por la distancia entre los rangos cercano y lejano.

La proyección del *rango oblicuo* sobre la superficie es denominada *rango en tierra* (*ground range*), y se obtiene mediante la división del rango oblicuo por el seno del ángulo de incidencia local pixel a pixel. El ángulo de incidencia se define como el ángulo entre la normal a la superficie que pasa por el blanco y el rango oblicuo del mismo. Este ángulo se incrementa desde el rango cercano hacia el lejano.

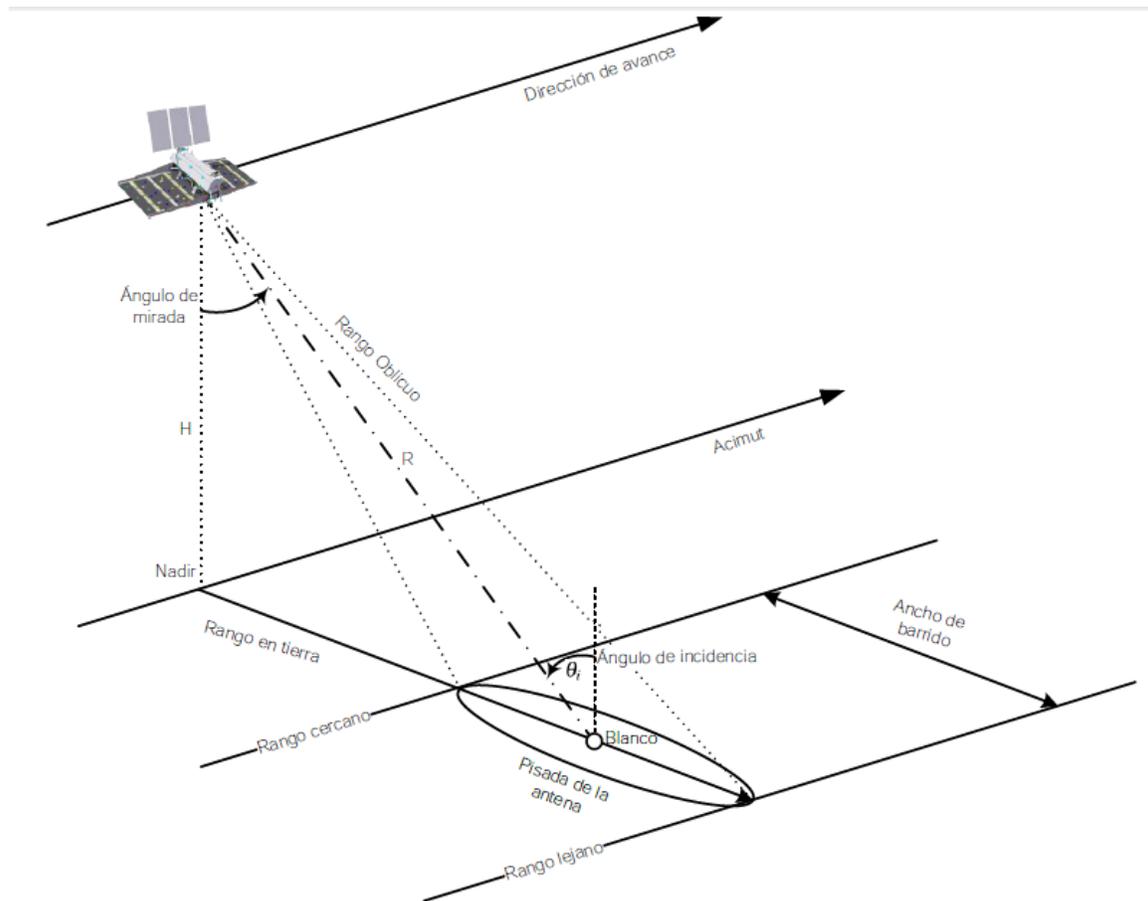


Figura 4: Esquema de adquisición de imágenes de un SAR (Panozzo Zénere, 2013).

En un sistema SAR, la resolución tiene dos dimensiones, una en la dirección del rango (distancia sensor-objetivo) y otra en la dirección del acimut (plataforma de dirección de vuelo). La resolución en acimut está determinada por el ancho angular del haz y la distancia en rango oblicuo. El ancho del haz es una medida del ancho del patrón de iluminación, a medida que el haz se aleja de la plataforma la resolución en acimut disminuye ya que el área iluminada es más grande (Karszenbaum, 2007). La resolución en acimut depende del largo de la antena sintética y es proporcional al tamaño de la antena real (SARMAP, 2008).

2.3. Polarización

Como se mencionó en la sección 2.1, un sistema SAR emite energía en forma de onda electromagnética. Una onda electromagnética está formada por un campo eléctrico y un campo magnético oscilantes perpendiculares entre sí, situados en un plano normal a la dirección de propagación (Fig. 5).

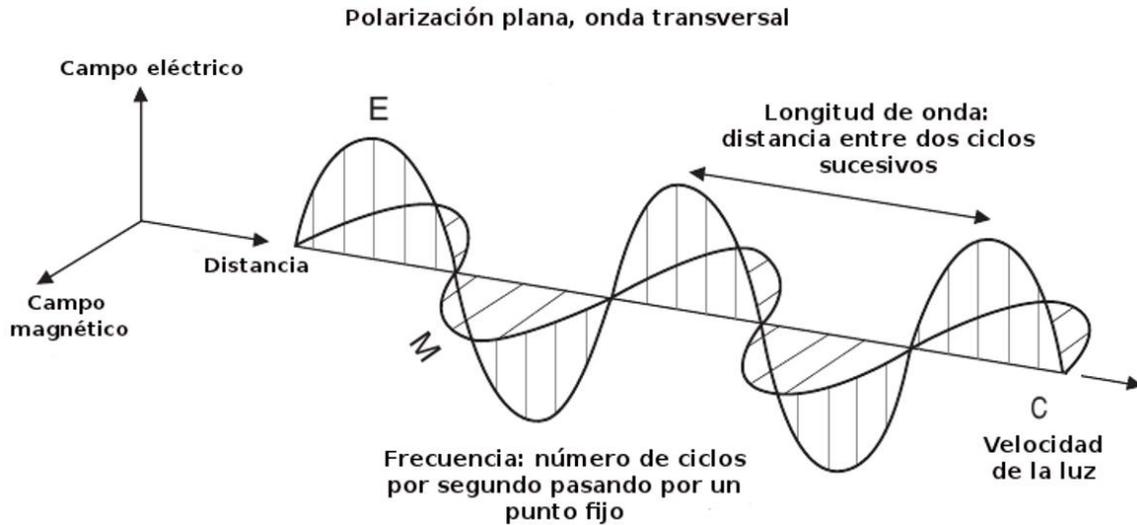


Figura 5: Componentes de una Onda Electromagnética (Depósito de documentos de la FAO⁴).

Las tres características principales de las ondas electromagnéticas son: la frecuencia (f), la longitud (λ) y la amplitud (A). La frecuencia de una onda responde a un fenómeno físico que se repite cíclicamente un número determinado de veces durante un segundo de tiempo, la unidad de medida es ciclo/segundo o Hertz (Hz). La longitud de una onda está dada por la distancia horizontal entre dos picos sucesivos. La amplitud es la distancia que va desde el centro de la onda hasta el valor máximo que puede alcanzar el pico de la onda.

La polarización se define como la orientación según la cual el vector de campo eléctrico de la onda electromagnética oscila en el tiempo. Esta orientación puede determinar una polarización de tipo lineal, circular o elíptica. Se dice que la polarización es lineal cuando la orientación del campo eléctrico varía según una línea recta que puede ser horizontal o vertical (Fig. 6).

⁴ <http://www.fao.org/docrep/003/t0355s/T0355S02.htm>

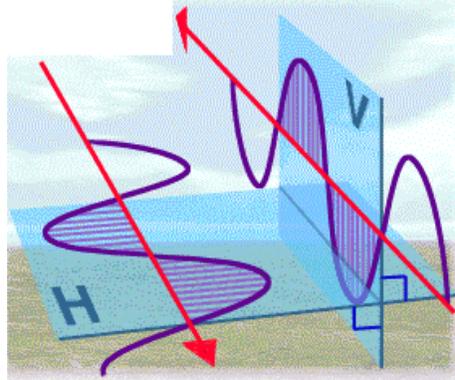


Figura 6: Polarización de la Onda Electromagnética (SARMAP, 2008)

La onda electromagnética es horizontalmente polarizada cuando el vector de campo eléctrico es perpendicular al plano de incidencia de la onda (plano que contiene un vector normal a la superficie o el vector de propagación de onda) o de una manera general, cuando el vector campo eléctrico es paralelo a la superficie observada. Usualmente los sistemas de radar utilizan polarizaciones lineales paralelas (co-polarizadas) HH / VV o cruzadas (cross-polarizada) HV / VH.

Los sistemas SAR de polarización completa o full polarimétrico, como el caso del SAOCOM, están adaptados para emitir y recibir la onda en cualquiera de las cuatro combinaciones posibles HH, VV, HV y VH. Las señales medidas en estos cuatro canales representan toda la información que es posible obtener de un blanco y se expresa como una matriz de polarización.

2.4. Interacción de la radiación electromagnética con la materia

La mayoría de los sistemas SAR trabajan en general en un estrecho rango de frecuencias centrado en la portadora. Las más utilizadas para aplicaciones de teledetección son las correspondientes a las bandas X (3cm), C (6cm) y L (24cm). Cada una de estas bandas permite obtener distinta información de la superficie, ya que la longitud de onda gobierna los mecanismos de interacción que tiene la señal con los blancos en tierra (Curlander y McDonough, 1991). Además, la frecuencia utilizada influye en la capacidad de penetración de las ondas en el medio, la que es proporcional al aumento de la longitud de onda (Fig. 7).

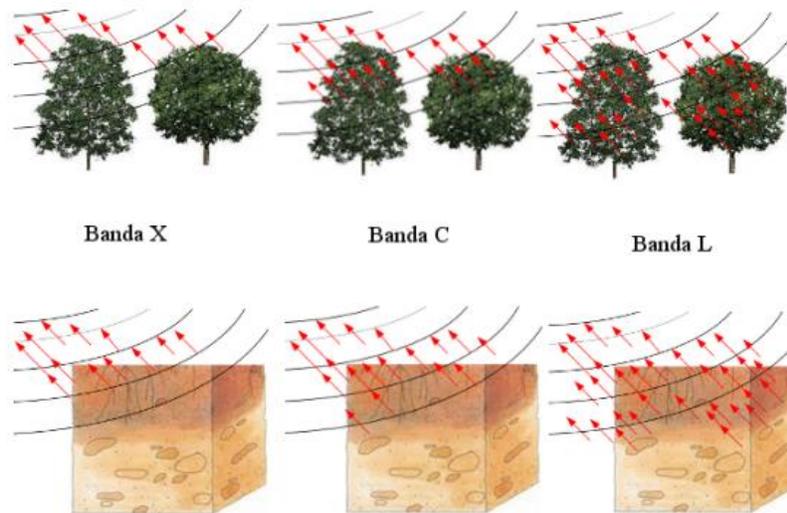


Figura 7: Penetración del pulso de radar en las bandas X, C y L (Lanfri, 2011).

Los mecanismos de interacción se definen como la forma en que el blanco interactúa con la señal enviada por el radar y por lo tanto con la energía que retorna al mismo. Están condicionados por la constante dieléctrica del blanco y la geometría de los mismos. Existen cuatro tipos de interacciones (Fig. 8):

- Reflexión Especular: cuando la señal del radar interactúa con una superficie lisa, esta superficie se comporta como un espejo, es decir la señal incidente y la señal retrodispersada tienen direcciones opuestas. La señal que vuelve al radar es casi nula y por lo tanto se visualiza con tonos negros en la imagen.
- Reflexión Difusa: este tipo de interacción se produce cuando la superficie que se observa es rugosa. El grado de rugosidad va a influir en la intensidad de la señal de retorno. En la imagen se visualiza en diferentes tonos de grises.
- Dispersión doble rebote: es el resultado de la interacción de una señal radar con dos superficies perpendiculares. Cuando se produce dicho mecanismo se observa un tono blanco en la imagen de radar, ya que la señal retrodispersada es muy fuerte. Algunos ejemplos de elementos que generan doble rebote son: áreas urbanas, barcos en el agua, tronco de árboles sobre superficies inundadas, etc.
- Retrodispersión en volumen: es el resultado de la interacción con partículas dentro de un medio no homogéneo. Se produce cuando existen muchas interacciones entre la señal de radar y un medio. La señal retrodispersada dependerá de la densidad del medio, la geometría de los elementos dispersores y las propiedades dieléctricas de los elementos. En este caso, la señal retrodispersada es media y se observa en la imagen radar en tonos grises y

blancos. Ejemplos de superficies con dispersión en volumen: pajonales, cultivos, copas de árboles, etc.

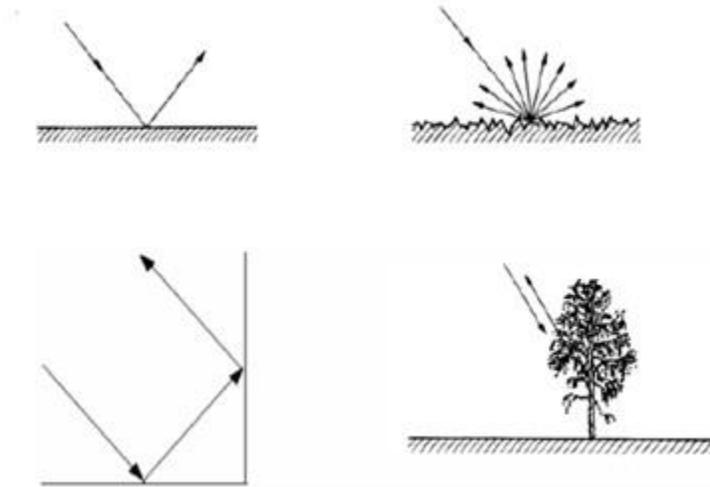


Figura 8: Mecanismos de retrodispersión: reflexión especular, reflexión difusa, doble rebote y retrodispersión en volumen (SARMAP, 2008)

2.5. Distorsiones geométricas y radiométricas

Como en todos los sistemas de teledetección, la geometría de observación genera distorsiones geométricas en la imagen resultante, especialmente en áreas de montaña o de relieve pronunciado (Fig. 9). Estas distorsiones son conocidas como:

- *Acortamiento (foreshortening)*: aparece en casos donde las pendientes están orientadas hacia el sensor al momento de la captura de la imagen. Las laderas aparecen “comprimidas” en la dirección de rango oblicuo, es decir, se presentan en la imagen como si fueran más cortas de lo que en realidad son (CCRS, 2001).
- *Inversión (layover)*: ocurre cuando las pendientes del terreno son mayores al ángulo de visión del radar, causando que la parte superior e inferior de la pendiente estén invertidas en la imagen SAR (SARMAP, 2008). Esto significa que los ecos de la parte superior de un objeto llegan antes que los de su base.
- *Sombra (shadow)*: la región de la superficie del terreno que no se ilumina por el radar se visualiza negro en la imagen, ya que no se recibe señal de estas regiones. Las sombras se presentan detrás de las cumbres, en la dirección del alcance y son indicadoras de la dirección de iluminación (CCRS, 2001).

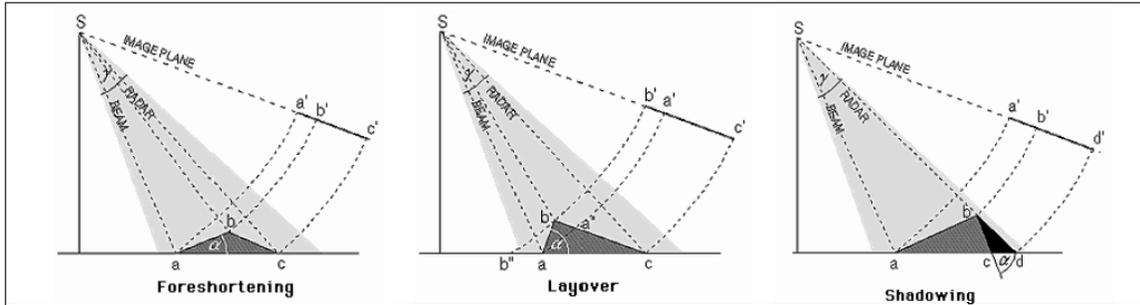


Figura 9: Distorsiones geométricas debido a la topografía del terreno (SARMAP, 2008)

Los efectos de acortamiento pueden ser corregidos en la imagen si se dispone de un Modelo Digital de Elevación (DEM) de alta resolución. Las áreas de sombras y de inversión pueden ser calculadas con exactitud pero no corregidas (SARMAP, 2008).

En cuanto a distorsiones radiométricas, la señal de retorno del radar está sujeta a fluctuaciones aleatorias que son el resultado de la interacción de la onda electromagnética con superficies de terreno. El fenómeno conocido como *Speckle* es el resultado de la suma coherente de las ondas dispersadas por el blanco y consiste en interferencia a gran escala. Se visualiza en las imágenes SAR como un granulado claro y oscuro y representa un obstáculo para la clasificación, análisis e interpretación de la imagen.

Al ser el speckle un ruido multiplicativo, y no aditivo, resulta imposible extraerlo completamente de la imagen, sin embargo se puede reducir su efecto utilizando dos herramientas. La primera herramienta está relacionada al procesamiento de la imagen luego de su formación y se conoce como *Multilooking*. Partiendo de una adquisición es posible llevar esa imagen al plano de las frecuencias y subdividir dichas frecuencias como para simular múltiples adquisiciones correspondientes a múltiples “looks” de la misma escena y promediar luego los resultados. Cuantos más looks se promedien mayor reducción del speckle se logrará y por lo tanto mejorará la calidad radiométrica de la imagen, pero esto será a expensas de la pérdida de resolución espacial.

La otra herramienta que se utiliza para disminuir el speckle es la aplicación de filtros específicos, que pueden ser media, mediana, adaptativos (Lee, Frost, Gamma), etc. La reducción de ruido speckle mediante filtrado consiste en mover una ventana de dimensión variable, dependiendo de las características de la región y de lo que se quiera lograr con el filtro, sobre cada pixel de la imagen y aplicar un cálculo matemático utilizando los valores de pixel de la ventana y reemplazando el pixel central por el nuevo valor. La siguiente tabla resume las ventajas y limitaciones comparativas de los distintos tipos de filtros.

	Comparación Filtros		
	Media y mediana	Adaptativos	Fourier
Ventajas	<p>El filtro media conserva bien las características radiométricas.</p> <p>El filtro de mediana conserva de mejor manera la información de textura.</p> <p>Simple y computacionalmente baratos.</p>	<p>Preservan la resolución espacial manteniendo bordes y detalles finos.</p> <p>Proporciona una estimación precisa del coeficiente de retro-reflexión de áreas homogéneas (estacionarias).</p>	<p>Excelentes en la eliminación de ruidos periódicos.</p>
Limitaciones	<p>Disminuyen la resolución espacial de la imagen haciéndola borrosa y de bordes poco nítidos.</p> <p>Induce un efecto borroso en las áreas con una cierta textura.</p> <p>No se recomienda para imágenes radar.</p>	<p>Complejos de implementar y computacionalmente exigentes.</p> <p>Requieren como entrada parámetros dependientes de la imagen.</p> <p>Pueden generar "artefactos".</p>	<p>Muy exigentes a nivel computacional.</p> <p>Si el ruido a eliminar no es periódico o tiene un periodo poco definido al filtrarlo da como resultado un deterioro en la resolución espacial.</p>

Tabla 1: Ventajas y Limitaciones comparativas de Filtros

3. Factores que influyen la característica de la señal

Para extraer información precisa del contenido volumétrico de humedad de suelo (M_v) utilizando radar de apertura sintética (SAR), es necesario entender el grado en que otras variables, ya sea en el sistema SAR en sí mismo o del terreno, pueden influir en el coeficiente de retrodispersión SAR (σ^0). Las variables básicas del sensor SAR son la polarización, el ángulo de incidencia (θ) y la longitud de onda (λ) que ya fueron descritas en la sección anterior. Las características del terreno que se sabe que afectan el coeficiente de retrodispersión son la constante dieléctrica (ϵ) de la superficie, la presencia de vegetación y la rugosidad de la superficie.

Las propiedades eléctricas y magnéticas de los suelos son cruciales cuando uno utiliza métodos electromagnéticos. Estas propiedades son la conductividad, la constante dieléctrica y la permeabilidad magnética, las cuales se encuentran fuertemente afectadas por la estructura morfológica del suelo, la textura, porosidad, composición química, temperatura, entre otros factores. En la mayoría de los suelos (salvo aquellos que contienen materiales ferromagnéticos) se cumple que la permeabilidad magnética relativa se aproxima a uno, de lo que se puede inferir que para los suelos de la región de estudio de esta tesis (región pampeana) este parámetro no influye en la señal electromagnética.

A continuación se procede a describir cada uno de los parámetros que afectan la señal del blanco.

3.1. Definición de Constante Dieléctrica

La permitividad absoluta (ϵ), medida en el sistema internacional en F/m faradios por metro, se define como el producto entre la permitividad relativa del material (ϵ_r), que es una constante adimensional y la permitividad dieléctrica del vacío ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m):

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad (1)$$

La permitividad eléctrica relativa es una constante que da una medida de la capacidad de polarización de un material en presencia de un campo eléctrico. Proporciona un valor de respuesta estática del material cuando está en presencia de un campo eléctrico externo. La permitividad eléctrica se representa en forma compleja como:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i \cdot \varepsilon'' \quad (2)$$

Dividiendo por ε_0 esta expresión se obtiene una ecuación similar para la permitividad relativa:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \varepsilon_r = \varepsilon_r' - i\varepsilon_r'' \quad (3)$$

La parte real de la permitividad eléctrica se la llamada comúnmente constante dieléctrica y la parte imaginaria, asociada con fenómenos de conductividad, es conocida como factor de pérdidas (Vega G., 2001).

La componente imaginaria de la permitividad dieléctrica considera los retardos en la respuesta a la polarización del material sometido a un campo electromagnético (Satinen 1992, citado por Vega G., 2001), es decir, indica el factor de pérdidas dieléctricas. Por otro lado también contiene el factor que indica las pérdidas por conducción. De forma habitual se suele considerar esta componente imaginaria como:

$$\varepsilon_r'' = \varepsilon_d'' + \frac{\sigma_{dc}}{2\pi\varepsilon_0\nu} \quad (4)$$

Donde ν es la frecuencia del campo electromagnético externo, ε_d'' , es el factor de pérdidas electromagnéticas que se relaciona con la respuesta frente a fenómenos de relajación asociados con las moléculas de agua y σ_{dc} es la conductividad estática (es decir a frecuencia cero) (Vega G., 2001).

Reemplazando en la ecuación 3 obtenemos:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - i \left(\varepsilon_d'' + \frac{\sigma_{dc}}{2\pi\varepsilon_0\nu} \right) \quad (5)$$

Para frecuencias entre 10 Mhz y 1500 Mhz, en la mayor parte de los materiales del suelo, los fenómenos de desplazamiento (o polarización), dominan sobre los fenómenos de conductividad. Este rango de frecuencias representa una ventana de medición libre de pérdidas dieléctricas, en la cual la parte real de la permitividad relativa (constante dieléctrica) es prácticamente constante y además es debida enteramente al agua libre. Esta es la ventana de medición donde operan la mayoría de los sensores de humedad de suelo como las sondas TDR (TDR: time domain reflectometry típicamente entre 50 MHz y 100 MHz), es decir, basados en la medida de la constante dieléctrica del conjunto suelo-aire-agua, como así también las técnicas de medida basadas en sondas de capacitancia y reflectometría en el dominio de la frecuencia (FDR).

3.2. Constante Dieléctrica del suelo

El suelo es un sistema de tres fases que consiste en aire, partículas sólidas y agua, la cual se puede encontrar libre o ligada a las partículas del suelo. En un medio no homogéneo tal como el suelo, la constante dieléctrica es una combinación de las constantes dieléctricas individuales de sus componentes, es decir: aire ($\epsilon_a \sim 1$), agua ($\epsilon_w \sim 80$), suelo seco ($\epsilon_s \sim 4$), etc. Este amplio contraste que existe entre de la constante dieléctrica del agua libre y del suelo seco está directamente relacionado con el contenido volumétrico de humedad de suelo (M_v), y está influenciada además por la textura del suelo (arena, limo o arcilla), temperatura, salinidad y densidad aparente (normalmente alrededor de $2,6 \text{ g / cm}^3$). La frecuencia, la temperatura y la salinidad sólo desempeñan un papel menor en comparación con el contenido de agua del suelo y la textura (Holmes 2003).

Material	ϵ	σ [mS/m]
Aire	1	0
Agua Dulce	80-81 (a 20°C)	0.1-10
Agua Salada	81-88 (a 20°C)	4000
Hielo	3 a 4	0.02 a 0.003
Limos Secos	3 a 10	
Limos Saturados	10-40	1-100
Grava	<8	<0.8
Grava Arenosa Saturada	15-22	<0.8
Arcilla Seca	3	0.25
Arcilla Húmeda	8-15	50-1000
Arcilla Limosa	30-50	>1000
Arena Seca	3-6	0.01
Arena Humedad	20-30	0.1-1
Suelo Agrícola	9-25	1-100
Turba	50-78	1-2

Tabla 2: Tabla con valores característicos de constante dieléctrica (ϵ) y conductividad (σ) (Miller, 2002).

Teniendo en cuenta esta dependencia, es posible estimar la humedad del suelo mediante la medición de la constante dieléctrica que esta a su vez relacionada con la intensidad del coeficiente de retrodispersión de radar (Barret et al., 2009). La alta constante dieléctrica del agua aumenta significativamente tanto las partes real e imaginaria de la constante dieléctrica del suelo a medida que la fracción volumétrica de agua en el suelo aumenta.

La figura 10 muestra la relación entre la constante dieléctrica y el contenido volumétrico de humedad del suelo para una variedad de tipos de suelo a una frecuencia de 1,4 GHz. Se observa una relación casi lineal, excepto a valores bajos de contenidos de humedad. Esta no linealidad en el bajo contenido de humedad es debido a los fuertes lazos desarrollados entre las superficies de las partículas del suelo y las películas delgadas de agua que los rodea, que impiden la libre rotación de las moléculas de agua. A medida que se añade más agua, las moléculas se alejan de la superficie de la partículas y son capaces de moverse libremente, lo que incrementa el valor de la constante dieléctrica del suelo (Schmugge, 1983).

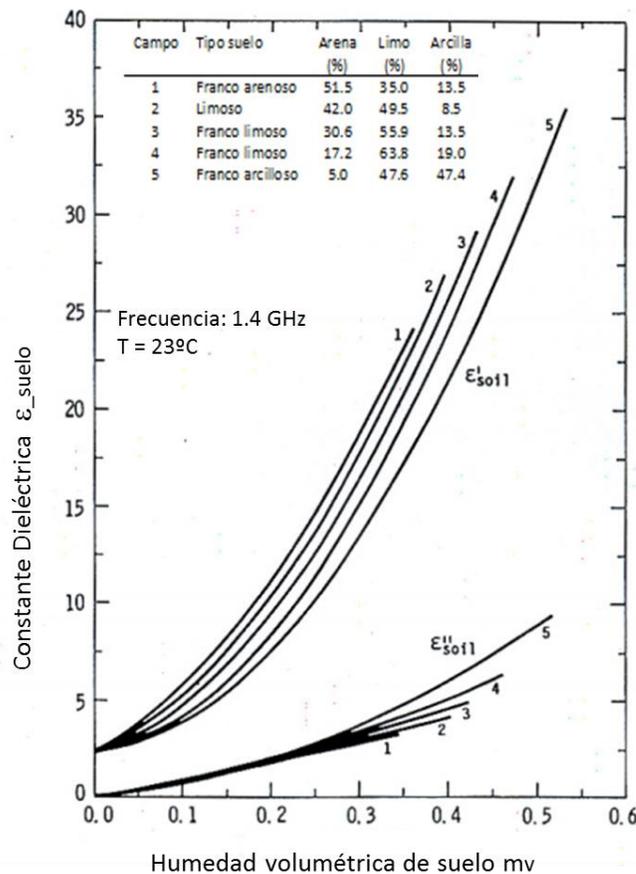


Figura 10: Constante dieléctrica como función de la humedad volumétrica del suelo para cinco suelos con diferente composición granulométrica a 1,4 GHz (Ulaby, 1986).

La dependencia de la constante dieléctrica con la textura del suelo se debe a diferencias en el porcentaje de agua ligada a las superficies de las partículas en los distintos tipos de suelos. El agua ligada exhibe menor rotación molecular en frecuencias de microondas y por lo tanto tiene un efecto dieléctrico menor que el agua libre en los espacios porosos. Esto se evidencia más en los suelos arcillosos, cuyas partículas tienen mayores áreas superficiales donde se adsorbe el agua y, además, estos suelos presentan mayor afinidad de unión para moléculas de agua (Njoku y Entekhabi, 1994).

La dependencia de la constante dieléctrica de la textura del suelo introduce cierto grado de incertidumbre en la estimación de la humedad del suelo, si la composición de la textura del suelo es desconocida. La textura de un suelo se determina sobre la base de las relaciones de masas de tres clases de tamaño de partícula: arena (0,05-2,0 mm), limo (0,002-0,05 mm), y arcilla (por debajo de 0,002 mm). Las clases texturales se definen de una manera gráfica en un diagrama triangular que representa los valores de las tres fracciones y se lo conoce como Triángulo de Textura USDA (Fig.11) (Hendrickx 2003).

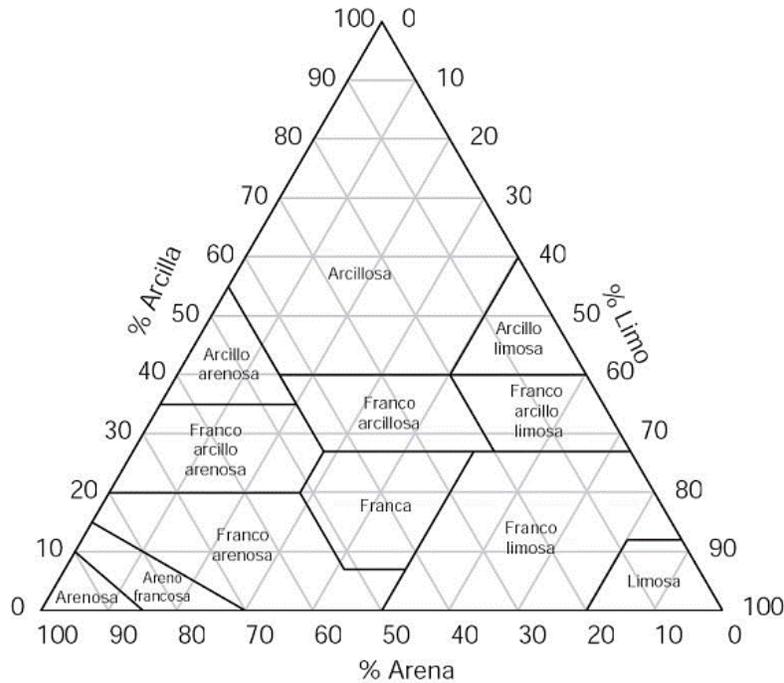


Figura 11: Triángulo de textura USDA, clases texturales del suelo convencionales basados en porcentaje de arcilla (por debajo de 0.002 mm), limo (0,002 hasta 0,05), y la arena (0,05-2,0).

3.3. Rugosidad

El segundo parámetro importante que, además de la constante dieléctrica, influye en el comportamiento de la retrodispersión de las superficies naturales es la rugosidad. La rugosidad superficial del suelo se caracteriza mediante dos parámetros obtenidos de los perfiles unidimensionales que la componen y que describen su componente vertical y horizontal de la rugosidad.

3.3.1 Valor cuadrático medio en alturas s (Root Mean Square Height, RMS):

Es la componente vertical de la rugosidad y describe la variación en elevación de la superficie por encima de un plano arbitrario. Se la define como la desviación estándar de las alturas en la misma:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}{n-1}} \quad (6)$$

Donde:

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \quad (7)$$

Para el caso de los suelos agrícolas, la rugosidad superficial está directamente relacionada con el tipo de laboreo que se realice. En la tabla 3 se encuentran los valores típicos de s para distintos tipos de laboreo:

TIPO DE LABOREO	s (cm)
Rastra de disco excéntrica	5,00
Arado de reja y vertedera	3,20
Sembradora Lister (sembradora de surco profundo)	2,50
Cinzel	2,30
Arado de disco	1,80
Cultivador	1,50
Cultivador abridor de surco	1,50
Arado rotativo o rotocultivador	1,50
Rastra de disco	1,50
Fertilizadora incorporadora de líquidos (amoníaco)	1,30
Escardadora	1,00
Sembradora	1,00
Siembra directa	0,70
Cama de siembra	0,60

Tabla 3: Valores característicos de s (Jackson et al. 1997).



Siembra Directa



Arado de reja y vertedera

Figura 12: Ejemplo de condiciones de campo y rugosidad para distintos tipos de coberturas

En Argentina el método más utilizado es el de siembra directa.

3.3.2 Longitud de Correlación l

Es el parámetro usado, junto con la función de autocorrelación (ACF), para describir la rugosidad de la superficie en forma horizontal. La longitud de correlación representa la distancia horizontal a partir de la cual se considera que dos puntos no están correlacionados (Ulaby et al, 1982). Superficies lisas en general tienen grandes longitudes de correlación mientras que las rugosas tienen bajos valores de longitudes de correlación. Los modelos electromagnéticos de medición de humedad del suelo asumen varias funciones de autocorrelación, las más usadas son:

Función de autocorrelación Exponencial:

$$\rho(s) = \exp\left(-\frac{|s|}{l}\right) \quad (8)$$

Función de autocorrelación Gaussiana:

$$\rho(s) = \exp\left(-\frac{s^2}{l^2}\right) \quad (9)$$

En la figura 13 se muestra la comparación entre ambas funciones de autocorrelación. Se observa que la ACF Exponencial decrece más lentamente que la Gaussiana, por lo tanto sirve para modelar suelos rugosos cuya escala de rugosidad es más extensa que aquellos suelos “gaussianos” (Karszenbaum, 2007).

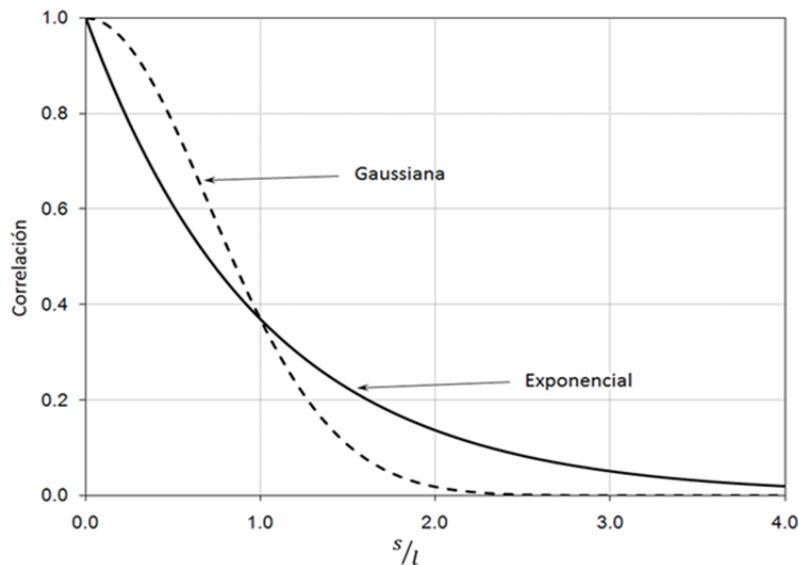


Figura 13: Comparación funciones de autocorrelación exponencial y gaussiana (Van Zyl et al., 2010).

Cabe destacar que la longitud de onda y el ángulo de incidencia de una onda electromagnética determinan como una superficie es “vista” por el radar, es decir si es lisa o rugosa. Las irregularidades de una superficie pueden aparecer brillantes en banda C y oscuras en banda L (Karszenbaum, 2007).

Existen también diversos criterios para establecer el grado de rugosidad de una superficie los cuales determinan el estado de rugosidad a partir de un valor límite del parámetro s en función de la longitud de onda y el ángulo de incidencia del haz del radar (θ). A continuación se muestra una recopilación de algunos de estos criterios (tabla 4), se observa que sólo en el criterio de Ulaby y Dobson (1988) el estado de rugosidad no es función del ángulo de incidencia.

Criterio de Rugosidad	Grado de Rugosidad
RAYLEIGH, citado por ELACHI (1988)	Ligeramente rugosa cuando $RMS < \lambda / 8 \cos \phi$ Para $RMS \geq \lambda / 8 \cos \phi$, la superficie es rugosa
FRAUNHOFFER, citado por ULABY et al. (1982)	Lisa cuando $RMS < \lambda / 32 \cos \phi$ Para $RMS \geq \lambda / 32 \cos \phi$, la superficie es rugosa
PEAKE & OLIVER (1971)	Lisa cuando $RMS < \lambda / 25 \cos \phi$ Para $RMS > \lambda / 4 \cdot \cos \phi$, la superficie es rugosa Intermedia en los demás casos
ULABY & DOBSON (1988)	Lisa cuando $RMS < 0,2 \lambda / 2 \pi$ Para $RMS > \lambda / 2 \pi$, la superficie es rugosa

Tabla 4: Criterios para establecer el grado de rugosidad (Salgado, 2006; adaptación de Beaulieu et al., 1995)

En términos de reflectividad de radar, se debe tener en cuenta que una superficie lisa mostrara un comportamiento de reflexión especular, mientras que una superficie rugosa difundirá a todas las direcciones incluso en la del sensor, el cual registrará un cierto porcentaje de la energía incidente (Fig. 14).

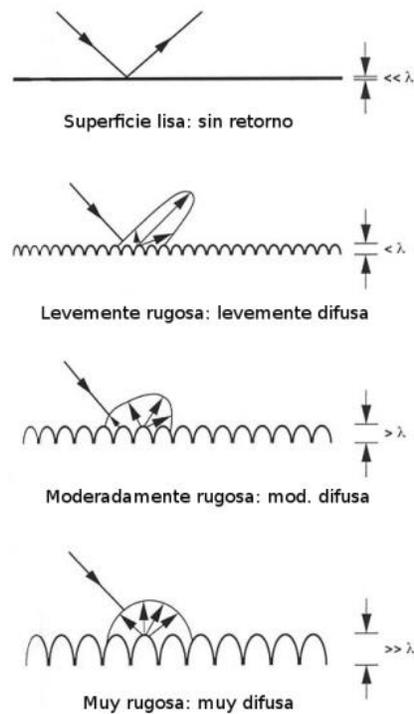


Figura 14: Retrodispersión de la superficie en función de su rugosidad (CCRS, 2001)

3.4. Modelos para relacionar la constante dieléctrica con la humedad de suelo

La relación entre la constante dieléctrica y la humedad volumétrica del suelo no es sencilla, muchos modelos dieléctricos empíricos y teóricos se han propuesto para describir esta relación. Van desde modelos simples que plantean una relación única para todos los tipos de suelo hasta modelos que incorporan las características del suelo como la textura.

De los modelos de humedad que se expondrán en el capítulo 4 sólo uno relaciona en forma directa el coeficiente de retrodispersión con la humedad del suelo. El resto de los modelos utilizan la constante dieléctrica, es por esto que se hace necesario el desarrollo de modelos que relacionen estos dos parámetros.

3.4.1 Modelo de Topp

En el enfoque empírico, las expresiones matemáticas se encuentran ajustadas a los datos observados. Este enfoque fue usado por Topp et al. (1980) que utilizó un polinomio de tercer orden para ajustar las relaciones entre la permitividad aparente (K_a) medida por TDR y el contenido de humedad volumétrica de suelo, M_v (cm^3/cm^3), para múltiples suelos. En su estudio empleó un radar con rango de frecuencia variable entre 1-MHz y 1-GHz.

Para materiales homogéneos con bajas pérdidas eléctricas la permitividad aparente puede escribirse como una función de la permitividad del suelo

$$K_a^{1/2} = \left(\left\{ 1 + \left[1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \frac{\varepsilon'}{2} \right)^{1/2} \quad (10)$$

Como para el rango de frecuencia que trabajan estos sensores la parte real de la permitividad es mucho mayor que la parte imaginaria, podemos relacionar la permitividad aparente medida por el sensor y la constante dieléctrica, utilizando la ecuación anterior

$$\varepsilon'' \ll \varepsilon' \Rightarrow K_a \approx \varepsilon' \quad (11)$$

A partir de sus experimentos con un amplio rango de materiales porosos y contenidos de humedad de suelo diversos, encontró la siguiente relación empírica invertible entre la constante dieléctrica aparente y el contenido volumétrico de humedad de suelo:

$$M_v = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} K_a - 5.5 \times 10^{-4} K_a^2 + 4.3 \times 10^{-6} K_a^3 \quad (12)$$

$$K_a = 3.03 + 9.3 M_v + 146 M_v^2 - 76.7 M_v^3 \quad (13)$$

Esta llamada ecuación de 'calibración universal' obtenida de un ajuste de cuatro suelos minerales es ampliamente utilizada en suelos gruesos y de textura media y ha demostrado ser muy exitosa (Robinson, DA et al., 2005) si se usa para contenidos de agua que van de 0 a 50%. Sin embargo, en algunos suelos que contienen arcillas y materia orgánica (Schaap et al., 1996), o en agregados (Miyamoto et al., 2003) o porosidad anisotrópica (Jones, 2000), esta ecuación no describe los valores de permitividad bajos a menudo medidos.

3.4.2 Modelo Semi-empírico de Perplinsky

El enfoque semi-empírico, a diferencia del enfoque empírico, contiene un modelo de las constantes dieléctricas complejas y de la fracción volumétrica de cada uno de los componentes el suelo para derivar una relación entre la constante dieléctrica y el contenido volumétrico de humedad de suelo.

El modelo de Perplinsky utiliza una sonda dieléctrica insertada en 19 conjuntos de condiciones de suelos distintivos, distribuidos entre los cuatro tipos de suelo y varias condiciones de humedad. Para cada condición del suelo, se midieron las partes real e imaginaria de la constante dieléctrica compleja relativa (ϵ) en 21 puntos de frecuencia equidistantes, que cubre el rango entre 0,3 y 1,3 GHz. Estas mediciones corresponden a 399 puntos de datos para la parte real (ϵ') y el mismo número para la parte imaginaria (ϵ'') (Peplinski et al., 1995). Estas mediciones dieléctricas se realizaron en cuatro tipos de suelos que se clasificaron mediante el esquema de clasificación de suelos USDA como el siguiente: franco limoso (15 % arena, 65 % limo y 20 % de arcilla), franco limoso (30 % arena, 60 % limo, y 10 % de arcilla), franco limoso (40 % arena, 55 % limo y 5 % de arcilla) y franco (50 % arena, 35 % limo y 15 % de arcilla). Las mediciones dieléctricas también fueron tomadas a 5, 10, 15, 20, y 25 % del contenido volumétrico de agua. En el rango de 0,3 a 1,3 GHz, encontraron que tanto la constante dieléctrica relativa y la conductividad efectiva de los suelos estaban directamente relacionados con la textura del suelo y el contenido volumétrico de agua (Miller, 2002).

Las entradas a este modelo consisten en el contenido volumétrico de agua M_v , la frecuencia f , la fracción de partículas de arena S , la fracción de partículas de arcilla C , la densidad de las partículas del suelo ρ_s (un valor típico es de 2.66 g/cm³), y la densidad aparente del suelo ρ_b (Miller, 2002).

$$\epsilon_b = \epsilon'_b + i\epsilon''_b \quad (14)$$

Donde la parte real e imaginaria de la constante dieléctrica del suelo se estiman a través de las siguientes ecuaciones:

$$\epsilon'_b = 1.15 \left[1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} (\epsilon_s^{0.65} - 1) + M_v^{\beta'} \epsilon_{fw}^{0.65} - M_v \right]^{0.65} - 0.68 \quad (15)$$

$$\epsilon''_b = \left[M_v^{\beta''} \epsilon_{fw}^{0.65} \right]^{0.65} \quad (16)$$

Donde ϵ'_{fw} y ϵ''_{fw} son la parte real e imaginaria de la permitividad dieléctrica del agua libre, que se obtienen a partir de la fórmula de Debye modificada (ver en anexo A). Se puede determinar la conductividad efectiva de forma empírica

$$\sigma_{eff} = 0.0467 + 0.2204\rho_b - 0.4111S + 0.6614C \quad (17)$$

Las fracciones de arena y arcilla también entran en el modelo a través de dos constantes que dependen del tipo de suelo, pero son independientes de la frecuencia y el contenido de agua del mismo.

$$\beta' = 1.2748 - 0.519S - 0.152C \quad (18)$$

$$\beta'' = 1.33797 - 0.603S - 0.166C \quad (19)$$

3.4.3 Comparación entre Topp y Perplinsky para suelos de la Región Pampeana

Para determinar cuál de estos dos modelos es más apropiado para estimar la constante dieléctrica a partir de datos de humedad de suelo para la Región Pampeana, se realizaron simulaciones de ambos modelos tomando el valor más representativo de los cinco principales tipos de suelos de la región: franco-limoso, franco, limoso-franco-arcillosos, franco-arcillosos y franco-arenosa (Dadamia, 2010). Estos valores surgen de un análisis de la base de datos de suelos de INTA (1,2500000) en toda la región pampeana:

Tipo de Suelo	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
Franco-Limoso	14	74	12
Franco-arenoso-limoso	3	68	27
Arenoso-limoso	66	22	12
Limoso	40	40	20
Arcilloso Limoso	19	56	25

Tabla 5: Proporciones de componentes de suelo utilizados para la simulación de los modelos Topp y Perplinsky (Dadamia, 2010).

Como resultado se obtuvo el siguiente gráfico donde se observa que el modelo Topp es una muy buena aproximación para casi todos los tipos de suelos presentes en la región Pampeana, excepto para el caso de tipos de suelos franco arenosos.

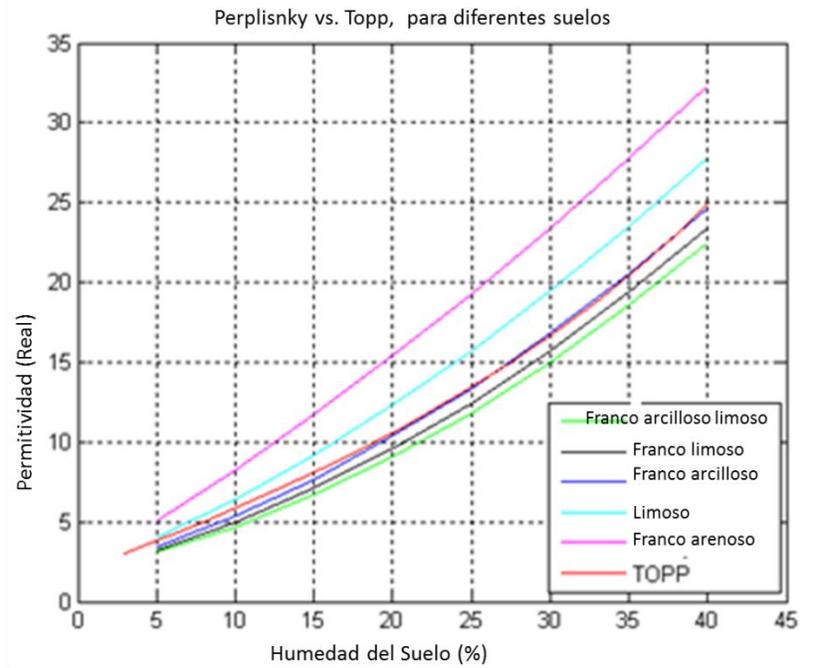


Figura 15: Simulación de los modelos Perplinsky y Topp para diferentes tipos de suelos del área pampeana (Dadamia, 2010).

En la presente tesis, el cálculo de ϵ para su posterior utilización como variable de entrada en los modelos electromagnéticos, se realizó en base al modelo empírico propuesto por Topp et al. (1980).

4. Modelos de humedad a suelo desnudo

Teniendo en cuenta las distintas configuraciones del sensor y parámetros biofísicos de la superficie, numerosos modelos se han desarrollado para relacionar el coeficiente de retrodispersión SAR con la humedad del suelo a través del contraste de las constantes dieléctricas de suelo desnudo y agua, mediante el análisis de las interacciones de las ondas electromagnéticas con la superficie.

Los modelos electromagnéticos se dividen en 3 grandes grupos: empíricos, semi-empíricos y teóricos (Barret et al., 2009).

4.1. Modelos Empíricos

Estos modelos establecen relaciones empíricas entre los parámetros del suelo y el coeficiente de retrodispersión observado. Los modelos empíricos encontrados en la literatura suelen ser derivados de conjuntos de datos específicos y son en su mayoría válidos para condiciones invariantes de rugosidad superficial y para parámetros fijos de adquisición de imágenes.

Los modelos empíricos pueden no ser aplicables para conjuntos de datos distintos de los utilizados en su desarrollo, lo que los vuelve específicos del lugar de estudio (Chen et al, 1995; Dubois et al, 1995). La falta de una base física detrás de este tipo de modelos minimiza su robustez en lo que respecta a su aplicación en humedad del suelo (Barret et al., 2009). Un ejemplo de este tipo de modelo se describe a continuación

Modelo de Dubois

El modelo empírico de Dubois fue desarrollado en 1995 y sólo trabaja con las componentes co-polarizada del coeficiente de retrodispersión. Las siguientes ecuaciones pueden ser invertidas para obtener humedad del suelo

$$\sigma_{HH}^0 = 10^{-2.75} \frac{\cos^{1.5}(\theta_{inc})}{\sin^5(\theta_{inc})} 10^{0.028\epsilon' \tan \theta_{inc}} (k_s \sin(\theta_{inc}))^{1.4} \lambda^{0.7} \quad (20)$$

$$\sigma_{vv}^0 = 10^{-2.35} \frac{\cos^3(\theta_{inc})}{\sin^3(\theta_{inc})} 10^{0.046\epsilon \tan \theta_{inc}} (ks \sin(\theta_{inc}))^{1.1} \lambda^{0.7} \quad (21)$$

Donde, σ^0 es el coeficiente de retrodispersión en componentes HH y VV, Mv es la humedad volumétrica del suelo, θ es el ángulo de incidencia local, s es la altura rms normalizada, λ es la longitud de onda, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ y ϵ es la constante dieléctrica.

Debido a que el modelo requiere sólo de dos componentes (HH y VV) puede ser aplicado para sistemas SAR de polarización dual y full polimétrico. Aunque el modelo de Dubois mostró resultados precisos, tiene la limitación de ser dependiente del sitio bajo estudio y por lo tanto sólo es válido para las condiciones en las cuales se tomaron las medidas.

El rango de validez del modelo es el siguiente:

- Humedad volumétrica del suelo: $4\% < Mv < 35\%$
- Ángulo de incidencia: $30^\circ < \theta < 70^\circ$
- $k \cdot s < 3$

4.2. Modelos Semi-empíricos

Los modelos de retrodispersión semi-empíricos representan un compromiso aceptable entre los enfoques teóricos y los empíricos. Se basan en consideraciones físicas, ya que contienen parámetros de ajuste derivados a partir de una gran cantidad de datos experimentales. En general, son sencillos de manejar y pueden ser fácilmente invertidos. Además, son independientes del área donde se trabaje y pueden ser aplicados cuando se dispone de poca o nula información sobre la rugosidad de la superficie.

Su relevancia es cuestionable debido a que representan la rugosidad de la superficie a través de un sólo parámetro, el valor cuadrático medio en alturas s , cuando se sabe que una superficie rugosa no puede ser satisfactoriamente caracteriza por un único parámetro (Pampaloni et al., 2004). Un ejemplo de este tipo de modelo se describe a continuación

Modelo de Oh

El modelo semi-empírico de Oh, en su versión original de 1992, relaciona el coeficiente de retrodispersión con la humedad volumétrica de suelo y la rugosidad de la superficie mediante dos parámetros: **p** que relaciona las componentes co-polarizada del coeficiente de retrodispersión y **q** que relaciona las componentes co y cros-polarizada de la onda. Este modelo utiliza como parámetro de entrada el contenido volumétrico de humedad de suelo en vez de la constante dieléctrica compleja, ya que considera que la retrodispersión del suelo es menos sensible al tipo de suelo en comparación con su sensibilidad a la rugosidad y la humedad volumétrica.

La última versión del modelo de OH (2004), incorpora una tercera ecuación que tiene en cuenta el coeficiente de retrodispersión para polarización cruzada. Las siguientes ecuaciones pertenecen a la versión 2004 del modelo:

$$p = \frac{\sigma_{HH}^{\circ}}{\sigma_{VV}^{\circ}} = 1 - \left(\frac{\theta}{90}\right)^{0.35} M_v^{-0.65} e^{-0.4(k \cdot s)^{1.4}} \quad (22)$$

$$q = \frac{\sigma_{VH}^0}{\sigma_{VV}^0} = 0.1 \left(\frac{s}{l} + \sin(1.3(\theta)) \right)^{1.2} (1 - e^{-0.9(ks)^{0.8}}) \quad (23)$$

$$\sigma_{VH}^0 = 0.11 M_v^{0.7} (\cos(\theta))^{2.2} [1 - e^{-0.32(ks)^{1.8}}] \quad (24)$$

Donde, σ^0 es el coeficiente de retrodispersión en componentes HH, HV y VV, M_v es la humedad volumétrica del suelo, θ es el ángulo de incidencia local, s es la altura rms normalizada, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ y l es la longitud de correlación.

Utilizando curvas de fiteo de datos experimentales, Oh obtuvo una relación para la componente **q** independiente de la longitud de correlación l , alegando que este parámetro es poco sensible a los cambios de esta componente (Oh, 2004) simplificando el problema de la inversión.

$$q = \frac{\sigma_{VH}^{\circ}}{\sigma_{VV}^{\circ}} = 0.095(0.13 + \sin(1.5\theta))^{1.4} (1 - e^{-1.3(k \cdot s)^{0.9}}) \quad (25)$$

El rango de validez del modelo es el siguiente:

- Humedad volumétrica del suelo: $4\% < M_v < 30\%$
- Ángulo de incidencia: $10^{\circ} < \theta < 70^{\circ}$
- $0.13 < k \cdot s < 6.98$

El modelo de Oh mejorado demostró una buena concordancia con las observaciones experimentales para una gama más amplia de valores de $k \cdot s$ que el modelo original. La principal ventaja de este modelo es que requiere de un sólo parámetro de rugosidad (altura rsm) y cuando se dispongan de datos full polarimétricos, tanto la constante dieléctrica como la rugosidad de la superficie se puede invertir sin necesidad de mediciones de campo (Barret et al., 2009).

4.3. Modelos Teóricos

Los modelos de retrodispersión teóricos derivan de la teoría de la difracción de las ondas electromagnéticas, es decir, simulan como es la dispersión de ondas electromagnéticas por una superficie dieléctrica aleatoriamente rugosa (Fung et al., 1992). Estos modelos son preferibles a los modelos empíricos y semi-empíricos, ya que proporcionan relaciones sitio-independientes que son válidos para diferentes configuraciones de sensor, y toma en cuenta el efecto que tienen diferentes parámetros de la superficie en la retrodispersión (Altese et al., 1996).

A pesar de su complejidad, sólo los modelos teóricos pueden producir una comprensión significativa de la interacción entre las ondas electromagnéticas y la superficie de la tierra. Sin embargo, la solución exacta de las ecuaciones que rigen la dispersión de superficie rugosa no está disponible todavía y varios métodos de aproximación se han desarrollado con diferentes rangos de validez (Pampaloni et al., 2004).

Los modelos clásicos de retrodispersión son los modelos Geometrical Optics Model (GOM) y Physical Optics Model (POM), también denominados modelos de Kirchhoff (KM), y el modelo Small Perturbation Model (SPM) (Ulaby et al., 1982). Los modelos de Kirchhoff son aplicables en condiciones de rugosidad alta o moderada y el modelo SPM es aplicable en superficies de rugosidad baja (Ulaby et al., 1982). El modelo Integral Equation Method (IEM) (Fung et al., 1992; Fung, 1994) integra los modelos de Kirchhoff y el modelo SPM y es por lo tanto aplicable a un rango más amplio de condiciones de rugosidad. El siguiente gráfico muestra los rangos de validez de los modelos mencionados.

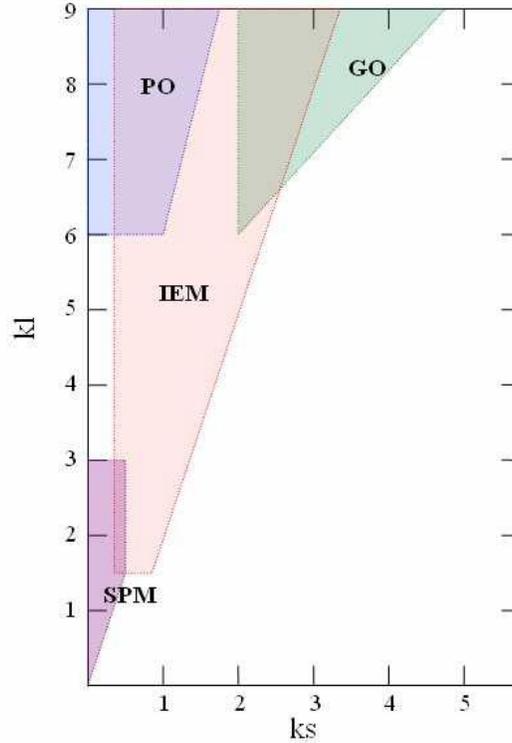


Figura 16: Región de validez en el espacio kl, ks (espacio de longitudes de correlación y alturas rms) de los modelos directos (Karszenbaum, 2007)

A continuación se describe uno de los modelos mencionados anteriormente

Modelo IEM

Este modelo simula la retrodispersión de una determinada superficie a partir de dos parámetros de rugosidad (la desviación típica de las alturas de la superficie del suelo (s) y su longitud de correlación (l)), la constante dieléctrica del suelo (ϵ) y teniendo en cuenta parámetros de observación como son la longitud de onda (λ), polarización y ángulo de incidencia (θ). Actualmente es el modelo más empleado para el estudio de la humedad del suelo a partir de imágenes SAR (Moran et al., 2004).

El modelo queda expresado en su forma general por las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_{pp}^{\circ} = \frac{k^2}{2} \exp[-2 k_z^2 s^2] \sum_{n=1}^{\infty} s^{2n} |I_{pp}^n|^2 \frac{W^n(-2 k_x^2, 0)}{n!} \quad (26)$$

donde el subíndice p indica la componente H o V, k es el número de onda ($k = 2\pi/\lambda$), $k_z = k \cos \theta$, $k_x = k \sin \theta$, θ es el ángulo de incidencia y s es la altura rms. En las

ecuaciones expuestas abajo, ε_r es la constante dieléctrica el suelo, μ_r la permitividad magnética, I_{pp}^n depende de k , s y de los coeficientes de Fresnel R_h y R_v y está dado por

$$I_{pp}^n = (2k_z)^n f_{pp} \exp(-k_z^2 s^2) + \frac{k_z^n [F_{pp}(-k_x, 0) + F_{pp}(k_x, 0)]}{2} \quad (27)$$

Siendo:

f_{pp} , Coeficientes de campo de Kirchoff.

$$f_{hh} = \frac{(-2R_h)}{\cos \theta} \quad f_{vv} = \frac{(-2R_v)}{\cos \theta} \quad (28 \text{ y } 29)$$

F_{pp} , Coeficientes de campo complementarios que se pueden calcular a partir de los coeficientes de reflexión de Fresnel modificados y la constante dieléctrica.

$$F_{hh} = 2 \frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta} \left[4 R_h - \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_r} \right) \cdot (1 + R_h)^2 \right] \quad (30)$$

$$F_{vv} = 2 \frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta} \left[\left(1 - \frac{\varepsilon_r \cos^2 \theta}{\mu_r \varepsilon_r - \sin^2 \theta} \right) (1 - R_v)^2 + \left(1 + \frac{1}{\varepsilon_r} \right) \cdot (1 + R_v)^2 \right] \quad (31)$$

$$R_h = \frac{\cos \theta - \sqrt{\varepsilon_r (1 - \sin^2 \theta)}}{\cos \theta + \sqrt{\varepsilon_r (1 - \sin^2 \theta)}} \quad R_v = \frac{\cos \theta - \sqrt{1/\varepsilon_r \cdot (1 - \sin^2 \theta)}}{\cos \theta + \sqrt{1/\varepsilon_r \cdot (1 - \sin^2 \theta)}} \quad (32 \text{ y } 33)$$

Las ecuaciones de Fresnel simulan el coeficiente de reflexión de la superficie como una función de la constante dieléctrica y el ángulo de incidencia con base en la polarización del sensor. Usando el coeficiente de reflexión es posible estimar la constante dieléctrica (Barret et al., 2009).

W^n es el espectro de rugosidad de la superficie. Se calcula a partir de la transformada de Fourier de la función de autocorrelación de la superficie $\rho(x,y)$:

$$W^n(k_x, k_y) = \frac{1}{2\pi} \iint \rho^n(x, y) \cdot \exp(jk_x x + jk_y y) dx dy \quad (34)$$

Bajo la hipótesis de isotropía, podemos considerar funciones de autocorrelación en la dirección radial. Como se mencionó antes en la sección 3.3.2 las funciones de autocorrelación más utilizadas son la gaussiana o la exponencial.

El rango de validez del modelo es el siguiente:

- Humedad volumétrica del suelo: $M_v < 40\%$
- $k \cdot s < 3$

Existen varias versiones del modelo IEM, la última versión fue expuesta por Fung et al. en el año 2004 y es la utilizada en esta tesis.

El siguiente cuadro resume las características de los modelos descritos anteriormente, así como las ventajas y desventajas de cada uno

Modelos	Características	Ventajas	Desventajas
Empíricos	Ajustes entre mediciones <i>in situ</i> y coeficiente de retrodispersión usando regresiones.	Simples	No hay base física detrás de los modelos. Sólo válidos para el área bajo estudio.
Semi-Empíricos	Basados en modelos teóricos e incorporan observaciones empíricas.	Buen compromiso entre la simplicidad de los modelos empíricos y la complejidad de los modelos teóricos. Fácilmente invertibles	Cada modelo tiene ciertos rangos de validez. Relevancia cuestionable ya que representan la rugosidad superficial con un sólo parámetro.
Teóricos	Simulan σ^0 como función de la humedad volumétrica, de la rugosidad superficial y la configuración del sensor.	Independientes del sitio de medición	Muchos parámetros de entrada torna compleja la implementación de los mismos.

Tabla 6: Cuadro resumen Modelos Electromagnéticos (Barret et al., 2009).

4.4. Otros enfoques para estimar humedad de suelo

Cabe destacar que además de los modelos electromagnéticos existen otros enfoques, que si bien no son abarcados en esta tesis, se procede a hacer una breve mención sobre los mismos. Algunas técnicas utilizadas en los mismos se describen a continuación.

- *Detección de Cambios:* entre dos imágenes de diferentes fechas se resta los valores del coeficiente de retrodispersión o bien se divide. La ventaja con la que cuenta este enfoque es que si las condiciones de rugosidad superficial y vegetación se mantienen invariables en el tiempo, la diferencia en el coeficiente de retrodispersión entre las dos fechas puede ser relacionado únicamente con cambios en el contenido de humedad superficial (Barret et al., 2009).
- *Fusión de Datos SAR:* los estudios de fusión de datos SAR han surgido como consecuencia directa de las dificultades encontradas a la hora de discriminar entre los múltiples factores que influyen sobre el coeficiente de retrodispersión y la humedad del suelo. La mayoría de los estudios tratan la integración de mediciones SAR con mediciones de radiómetros pero también algunos han trabajado con fusión de datos SAR y con datos ópticos. Como ventaja de este enfoque se logra minimizar los efectos de rugosidad y presencia de vegetación, sin embargo cuenta con problemas de escala y validación (Barret et al., 2009).
- *Interferometría Diferencial Radar (DInSAR):* es el proceso de producción de interferogramas de los cuales se ha eliminado la fase topográfica, lo que extiende su capacidad para medir las deformaciones de la superficie. Este enfoque plantea que las variaciones espaciales de la humedad del suelo podrían ser explicados por las diferencias de fase, ya que algunos estudios demostraron que una disminución de la fase (desplazamiento de la superficie) se correlaciona con un aumento en la humedad del suelo. La ventaja de este enfoque es su potencial para la estimación de humedad del suelo con un aumento de precisión, sin embargo el requisito de una alta coherencia limita la aplicación a suelo desnudo o con poca vegetación (Barret et al., 2009).
- *Polarimetría:* mediciones de SAR full-polarimétrico se han utilizado para estudiar la dependencia de la firma polarimétrica con los cambios de cobertura del suelo y sobre los parámetros de superficie, tales como la humedad de suelo y la rugosidad de la superficie. Este enfoque parte del análisis de la matriz de retrodispersión para describir de forma completa los diferentes tipos de mecanismos de dispersión dentro de la imagen. Una limitación importante, sin embargo, para la extracción de humedad de suelo mediante este procedimiento es la presencia de vegetación. Dos métodos principales que se han utilizado para separar los diferentes mecanismos de dispersión (y por lo tanto compensar los efectos de la vegetación) son: el uso de algoritmos de descomposición del blanco y de interferometría SAR polarimétrico (Barret et al., 2009).

5. Análisis de Sensibilidad de los Modelos

Con el objetivo de evaluar la sensibilidad teórica de los modelos de humedad de suelo desnudo que se utilizaran en esta tesis, los modelos de OH e IEM, se corrieron ambos modelos utilizando los siguientes parámetros de entrada:

- Humedad del suelo (Mv): 5% - 40%
- Rugosidad (s): 0.5 cm. - 5 cm.
- Angulo de incidencia: 20° - 50°
- Banda L ($\lambda=23\text{cm}$)

Se analizaron y compararon las sensibilidades para las principales variables que influyen en el coeficiente de retrodispersión (ángulo de incidencia, humedad del suelo y altura r_{sm}). Para el modelo IEM la permitividad magnética μ_r se asume con valor uno para zonas agrícolas, ya que se considera que no hay componentes magnéticos (esta aproximación no es válida por ejemplo para suelos volcánicos).

Como resultado se obtuvieron diversos gráficos que permiten observar la relación que existe entre el valor del coeficiente de retrodispersión, para componentes HH y VV, con los parámetros de humedad y rugosidad de suelo.

5.1. Simulaciones modelo de Oh

A continuación se muestran algunas de las gráficas obtenidas de las corridas usando el modelo de Oh, para un valor fijo de longitud de correlación ($l=20\text{ cm}$ para banda L).

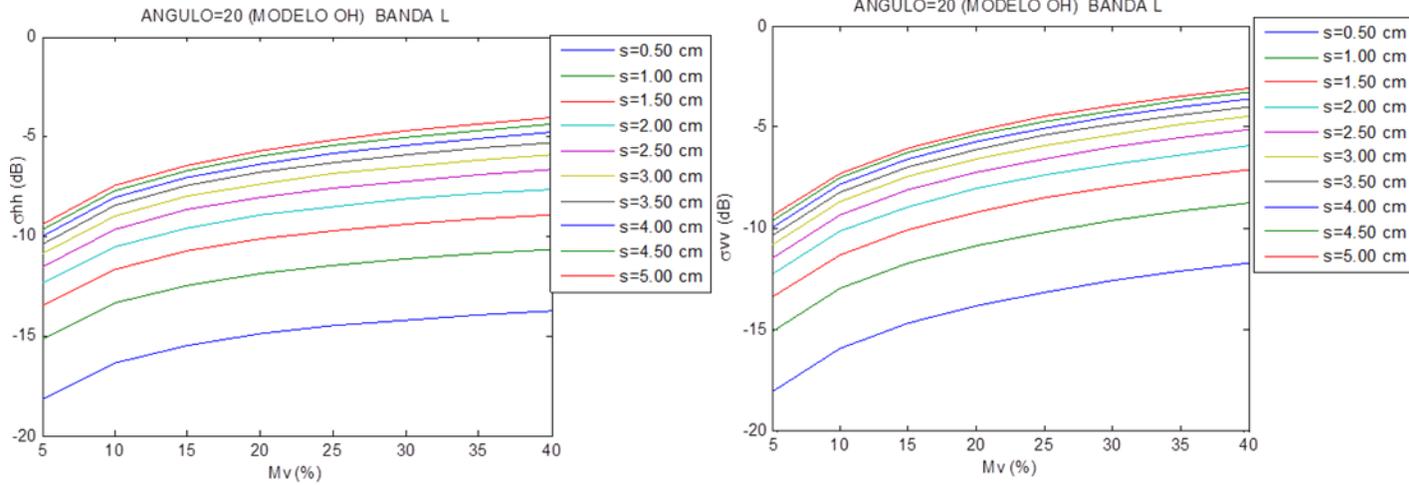


Figura 17: Simulación modelo de OH para banda L, ángulo de incidencia 20° y $l=20$ cm, a) σ_{HH}^0 vs. Mv
 b) σ_{VV}^0 vs. Mv

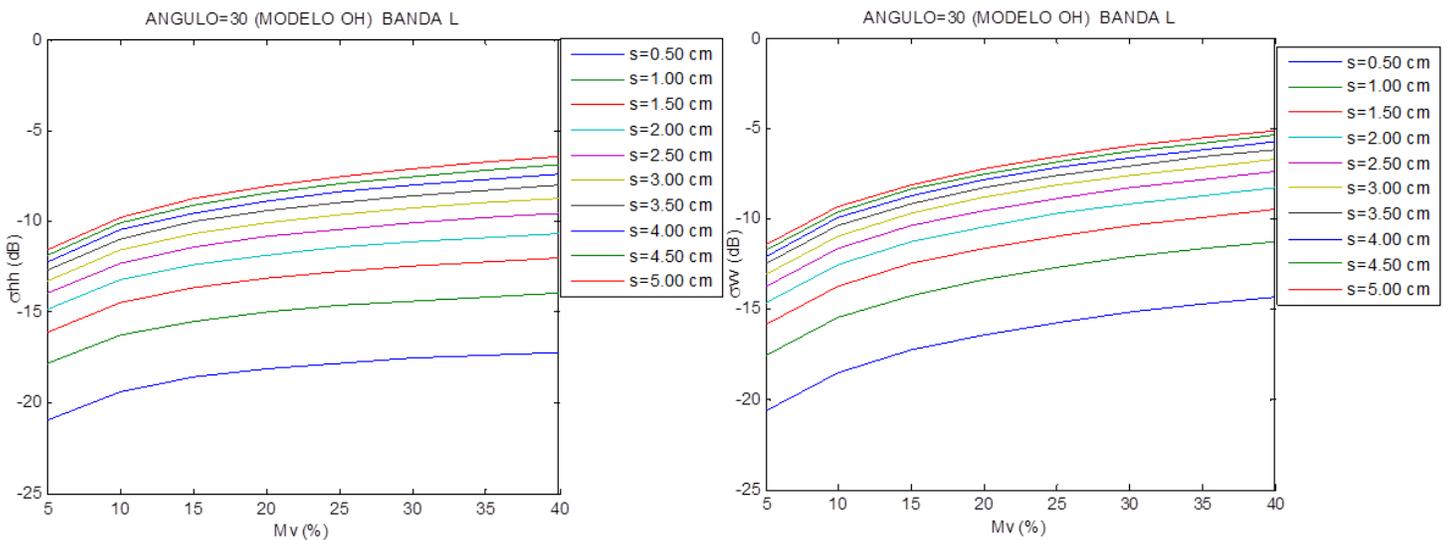


Figura 18: Simulación modelo de OH para banda L y ángulo de incidencia 30° y $l=20$ cm, a) σ_{HH}^0 vs. Mv
 b) σ_{VV}^0 vs. Mv

Las figuras 17 y 18 muestran, para un ángulo fijo, las curvas funcionales que relacionan el porcentaje de humedad del suelo con el valor del coeficiente de retrodispersión expresado en decibeles. A medida que el porcentaje de humedad se incrementa, el valor del coeficiente de retrodispersión aumenta. El mismo comportamiento se observa al graficar el coeficiente de retrodispersión versus el parámetro de rugosidad (Fig. 19 y 20). Suelos de baja rugosidad presentan valores bajos de retrodispersión debido a que

se comportan como reflectores especulares, mientras que suelos rugosos presentan valores más altos de coeficiente de retrodispersión.

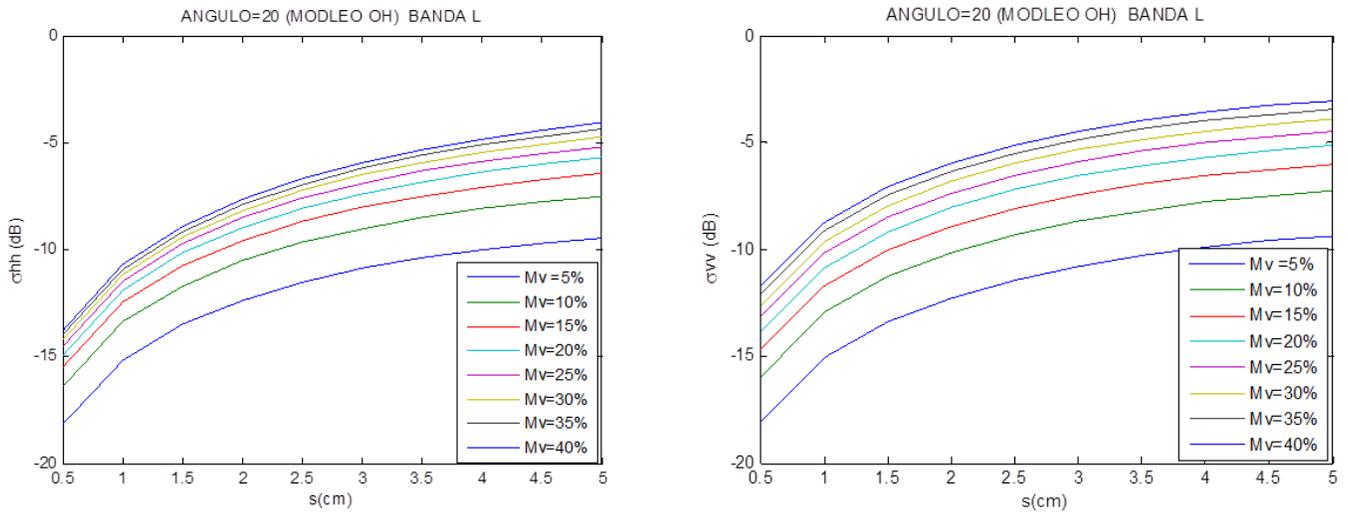


Figura 19: Simulación modelo de OH para banda L y ángulo de incidencia 20°, (a) σ_{HH} vs. Rugosidad
(b) σ_{VV} vs. Rugosidad.

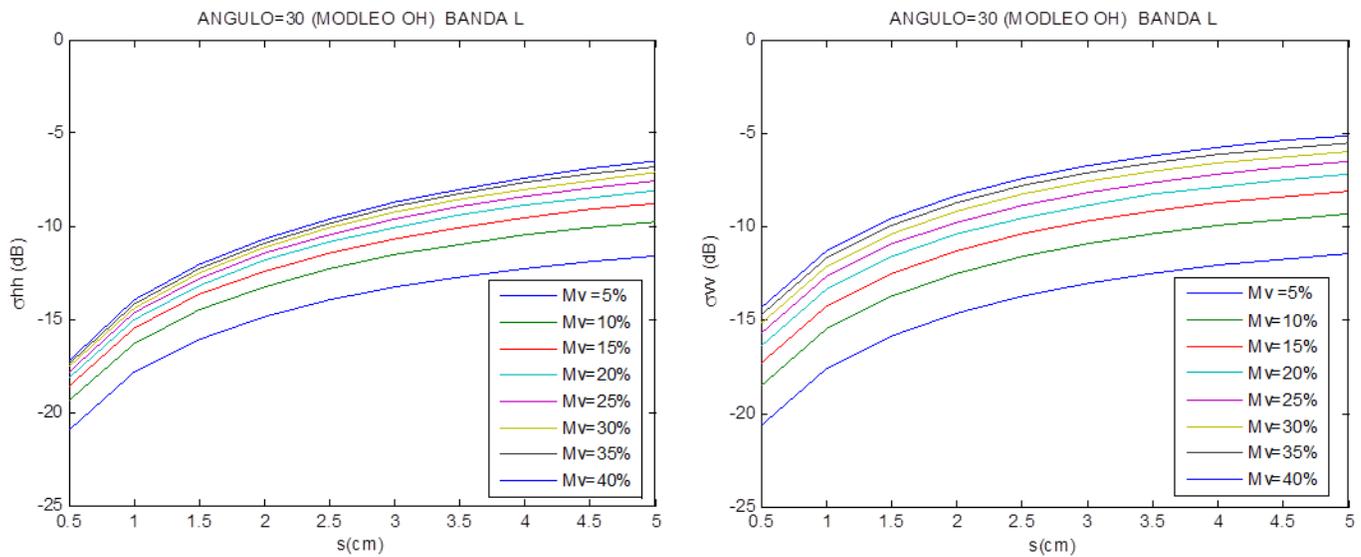


Figura 20: Simulación modelo de OH para banda L y ángulo de incidencia 30°, (a) σ_{HH} vs. Rugosidad
(b) σ_{VV} vs. Rugosidad.

Se observa también que al incrementar el ángulo de incidencia el efecto de la rugosidad se hace mayor, lo que da lugar a una disminución en los valores de retrodispersión de hasta 10 dB, como se puede observar en el siguiente gráfico (Fig. 21).

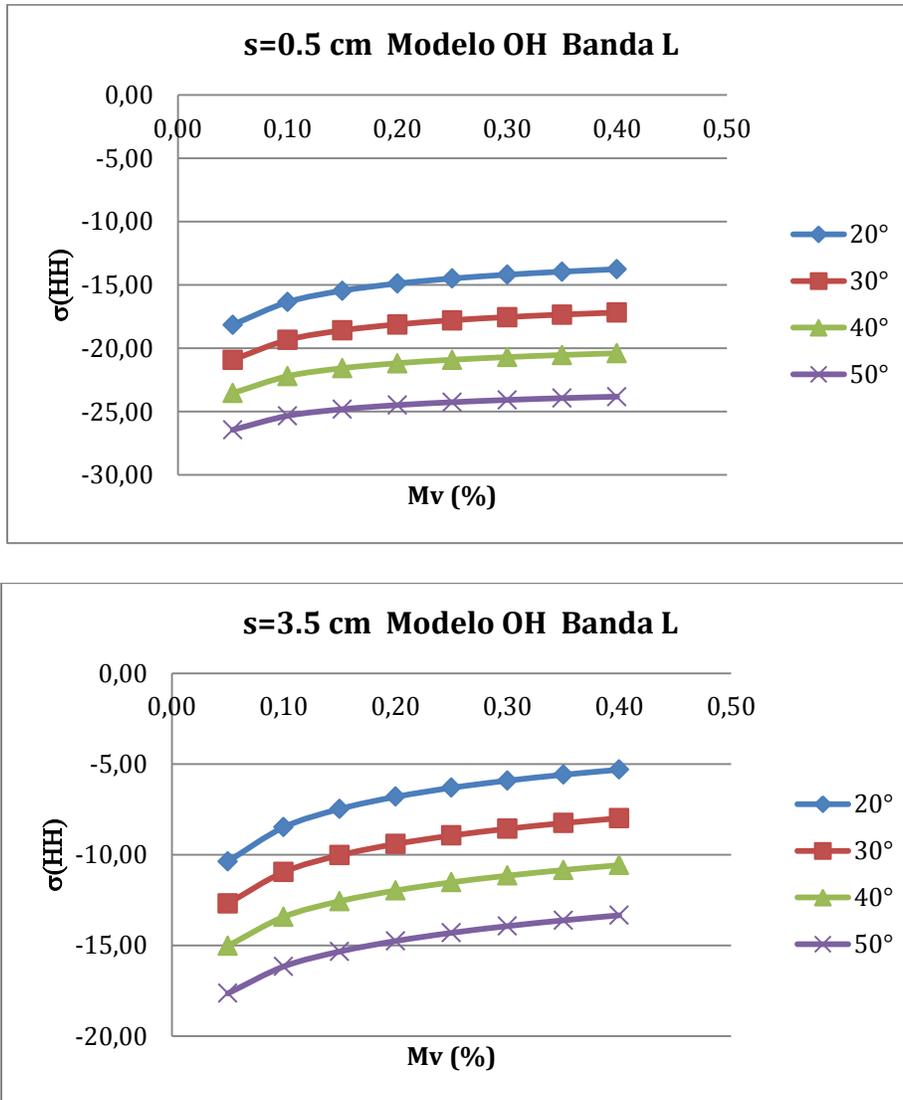


Figura 21: Simulación modelo de OH banda L con ángulo de incidencia variable y altura rsm fija de $s=0.5$ cm. y $s=3.5$ cm.

De la simulación del modelo Oh también se obtuvo como salida los siguientes gráficos 3D que vuelven a mostrar, para un ángulo constante, la relación que existe entre los tres parámetros bajo estudio (Fig. 22 y 23). El valor máximo de coeficiente de retrodispersión se obtiene en los valores máximos de altura rsm y de humedad volumétrica.

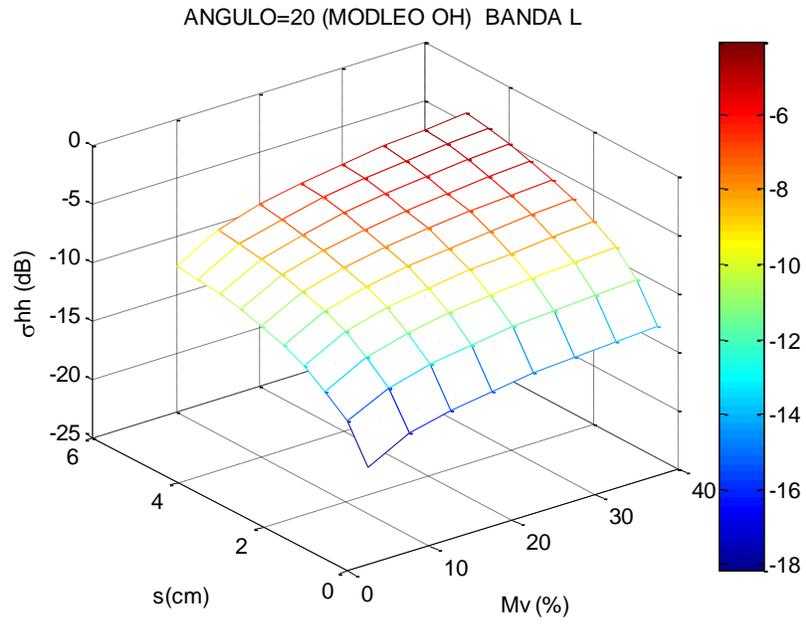


Figura 22: Simulación 3D del modelo de OH banda L para ángulo de incidencia de 20° y polarización HH

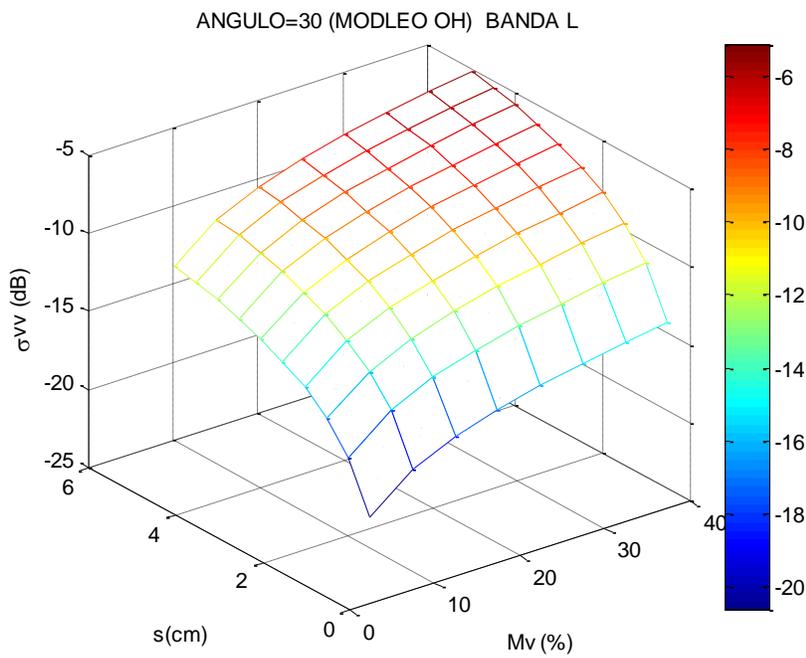


Figura 23: Simulación 3D del modelo de OH banda L para ángulo de incidencia de 30° y polarización VV

5.2. Simulaciones del modelo IEM

La figura 24 muestra la relación entre el coeficiente de retrodispersión para las componentes HH/VV y la humedad superficial del suelo, para niveles de rugosidad entre 0.5 cm - 5 cm y una longitud de correlación constante de 20 cm. Al igual que en el modelo de Oh, el valor del coeficiente de retrodispersión aumenta con el incremento del contenido de humedad de suelo.

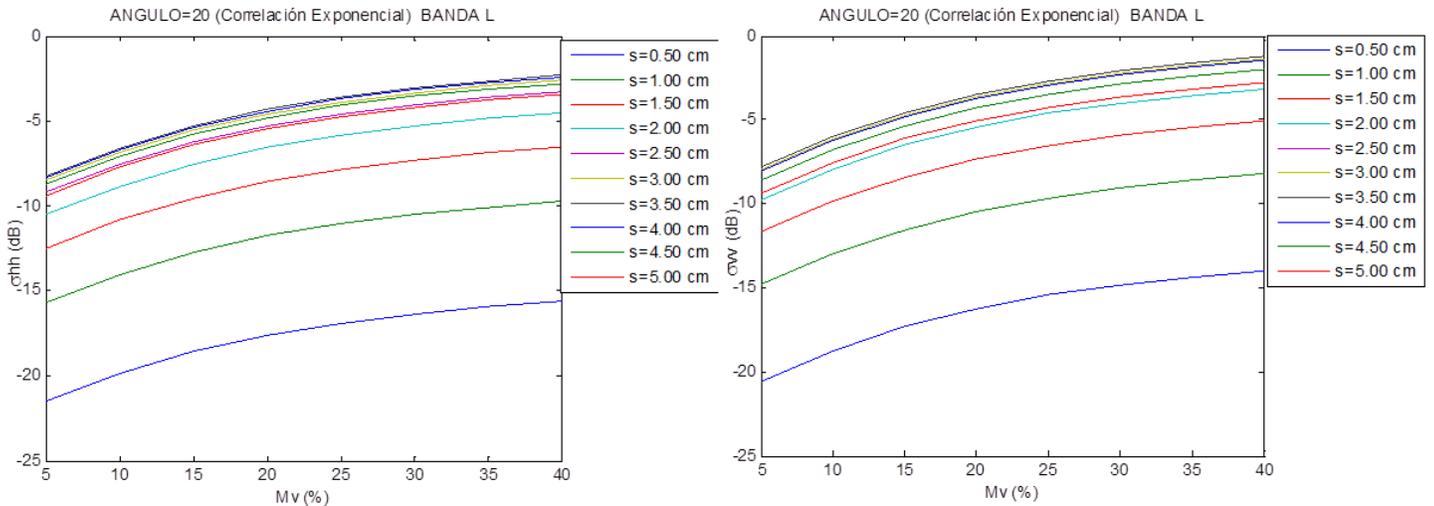


Figura 24: Simulación modelo IEM para banda L, ángulo de incidencia 20° y $l=20$ cm, (a) σ_{HH}^o vs. Mv (b) σ_{VV}^o vs. Mv

La Figura 25 muestra el comportamiento del coeficiente de retrodispersión en banda L (componentes HH, VV) representado en función de la rugosidad superficial, para valores de humedad de suelo entre 5% y 40%. Se observa que σ^o aumenta con el aumento de rugosidad superficial.

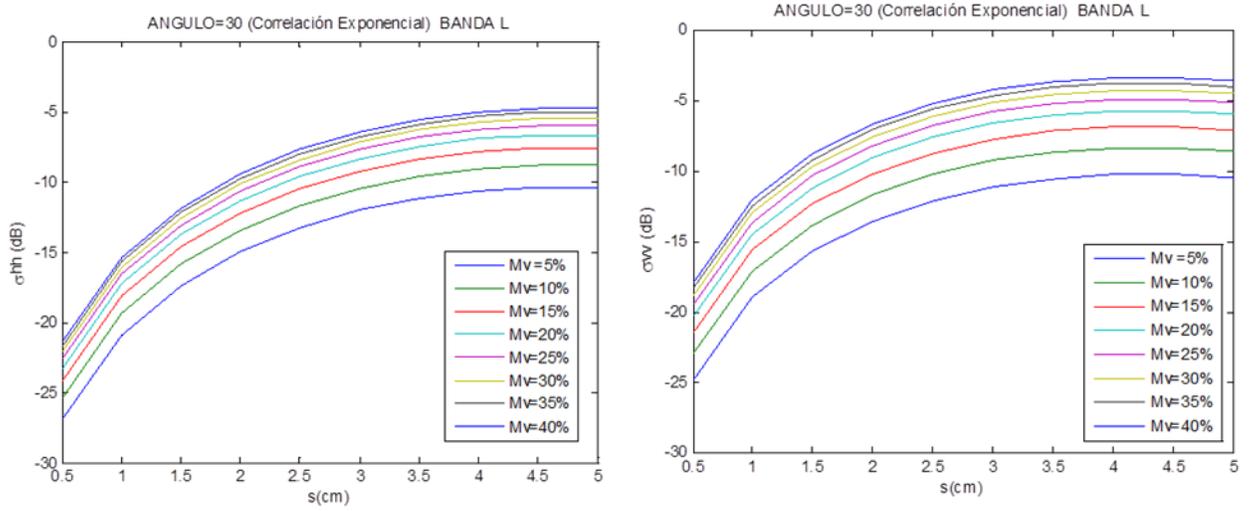
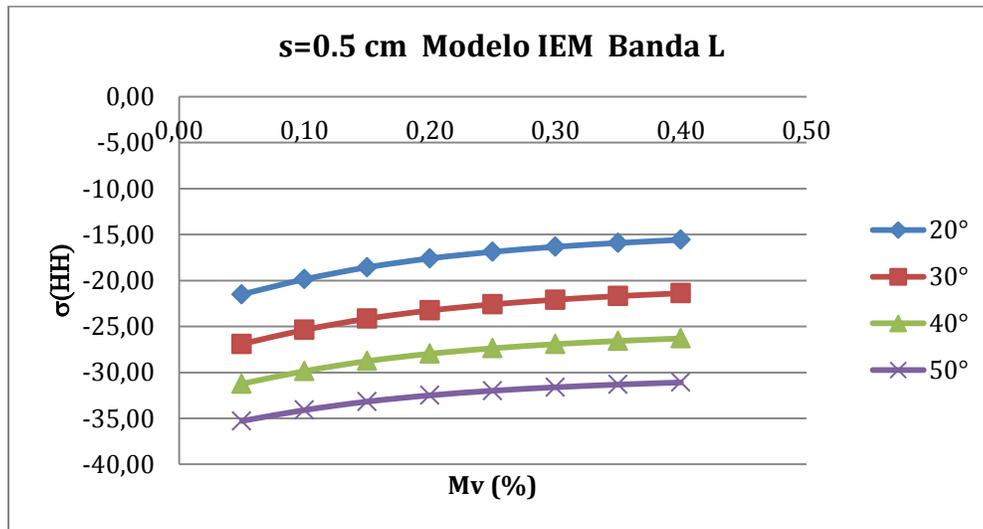


Figura 25: Simulación modelo IEM para banda L, ángulo de incidencia 30°, y l= 20 cm, (a) σ_{HH}° vs. Rugosidad (b) σ_{VV}° vs. Rugosidad.

La figura 26 muestra para dos niveles de rugosidades fijos y componente HH, como el coeficiente de retrodispersión decrece al aumentar el ángulo de incidencia.



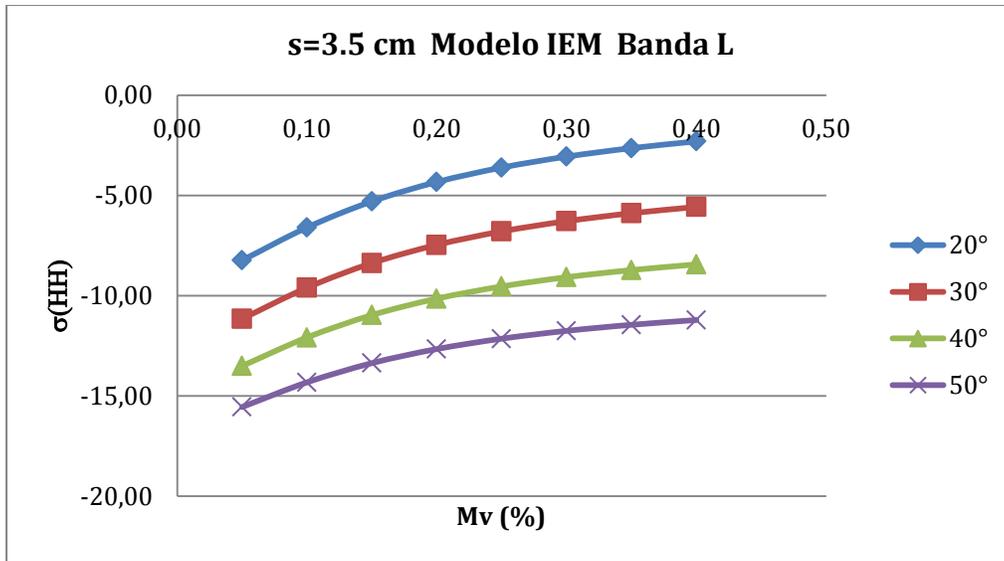


Figura 26: Simulación modelo IEM banda L con ángulo de incidencia variable, $l = 20$ cm y altura rsm fija de $s = 0.5$ cm. y $s = 3.5$ cm.

Al igual que en el modelo de Oh, se obtuvo como salida de las simulaciones del modelo IEM gráficos 3D para ambas polarizaciones HH/VV y ángulo fijo.

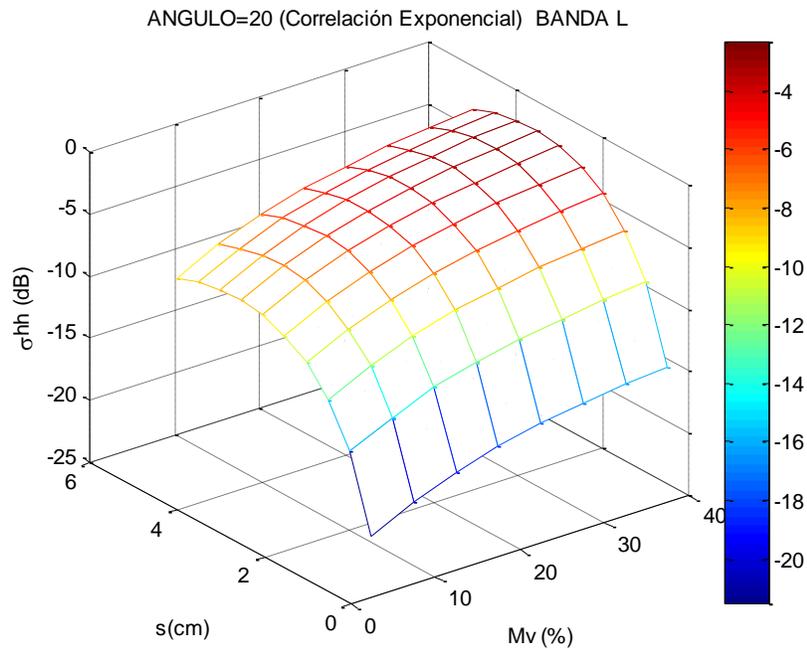


Figura 27: Simulación 3D del modelo de OH banda L para ángulo de incidencia de 20°, $l = 20$ cm y polarización HH

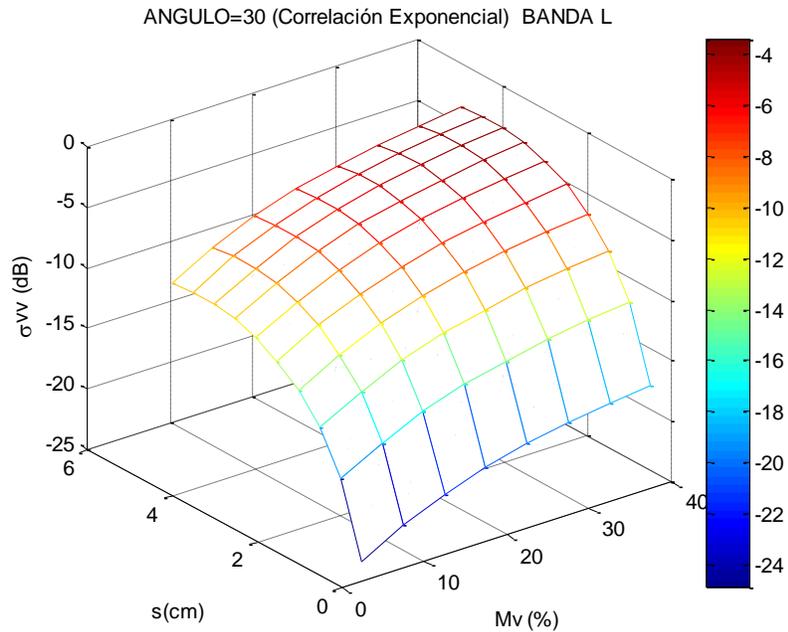


Figura 28: Simulación 3D del modelo de OH banda L para ángulo de incidencia de 30°, l= 20 cm y polarización VV.

Finalmente se realiza una comparación entre ambos modelos, para ello se obtienen los rangos dinámicos de las curvas, que muestran el rango aproximado de variación total en decibeles entre el menor y mayor valor que toma el coeficiente de retrodispersión (tabla 7).

Polarización	Modelo OH Rango Dinámico (dB)		Modelo IEM Rango Dinámico (dB)	
	HH	VV	HH	VV
Mv: 5%-40%	4.3	6.3	5.2	7.2
s: 0.5 cm - 5 cm	10.4	9.2	18.1	14.8
θ: 20°-50° y s=0.5 cm	9.5	7.3	14.9	9.0
θ: 20°-50° y s=3.5 cm	7.9	6.6	8.3	6.1

Tabla 7: Rangos Dinámicos Modelo de Oh y Modelo IEM en Banda L.

Analizando la tabla se observa que el modelo IEM presenta mayor sensibilidad que el modelo de Oh para todos los casos analizados, siendo más evidente para el caso del parámetro de rugosidad. El coeficiente de retrodispersión es más sensible cuando la humedad superficial del suelo es baja, al aumentar el contenido esta sensibilidad disminuye. Esta tendencia se verifica independiente del grado de rugosidad del suelo.

Las figuras 29-32 muestran superposición de curvas funcionales de cada modelo, donde se observa que si bien para ambos modelos dichas curvas tienen la misma tendencia existe una notable separación entre ellas.

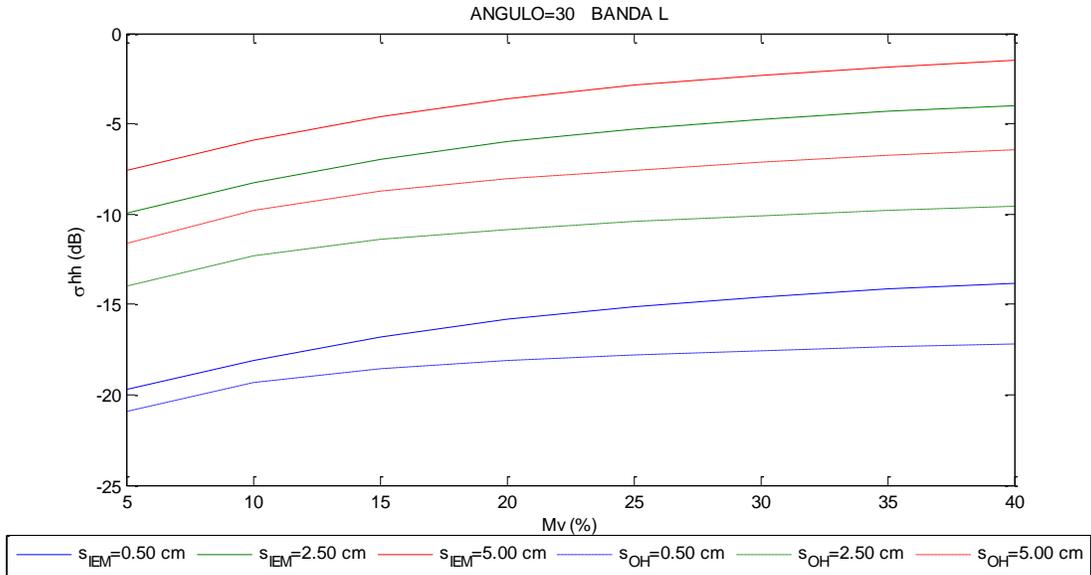


Figura 29: Curvas funcionales modelos Oh e IEM, σ_{HH}° vs Mv (%) para 3 niveles de rugosidad y ángulo de incidencia de 30°

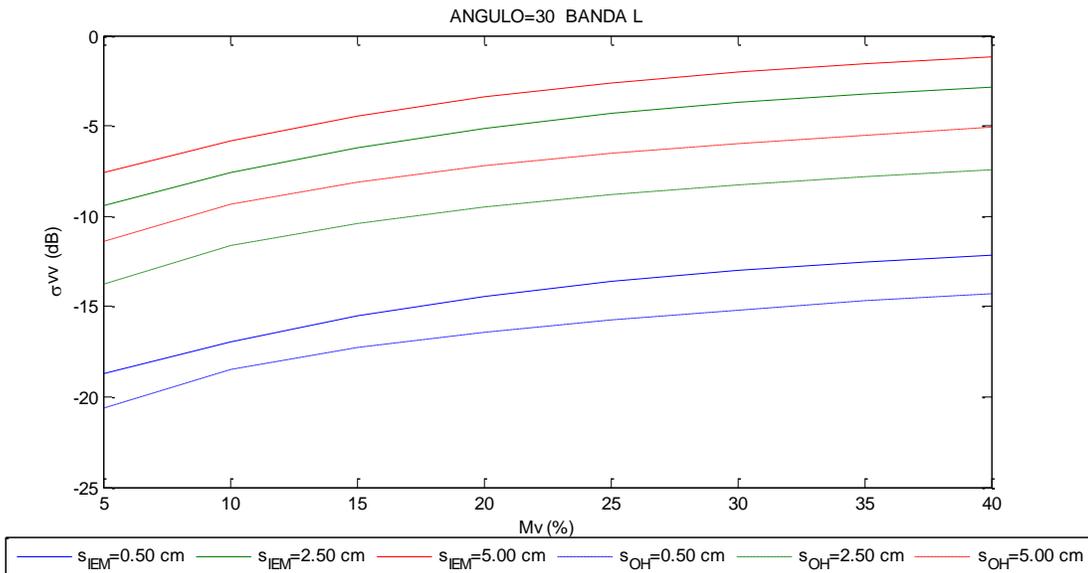


Figura 30: Curvas Funcionales modelos Oh e IEM, σ_{VV}° vs Mv (%) para 3 niveles de rugosidad y ángulo de incidencia de 30°

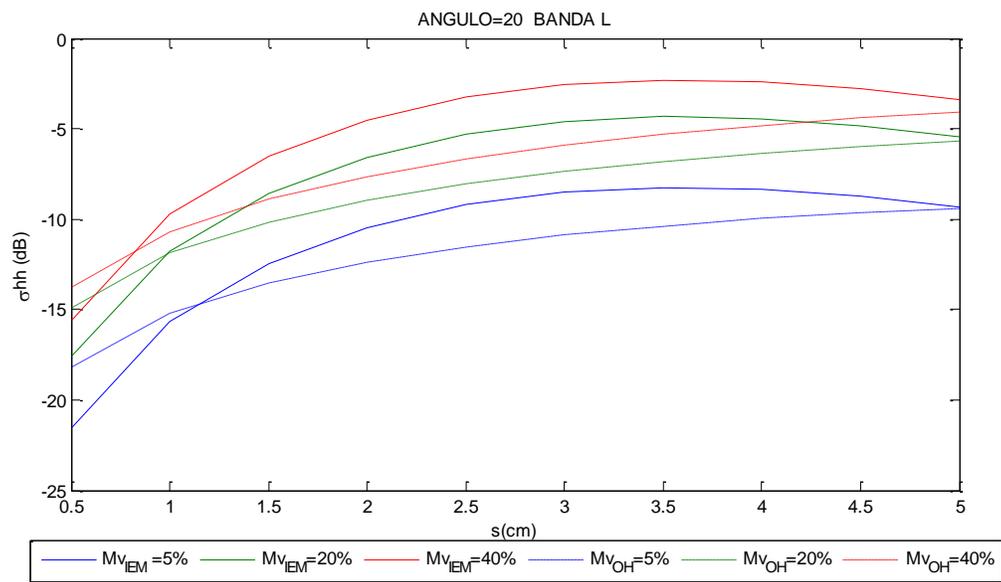


Figura 31: Curvas funcionales modelos Oh e IEM, σ_{HH}^o vs rugosidad (cm) para 3 niveles de humedad superficial y ángulo de incidencia de 20°

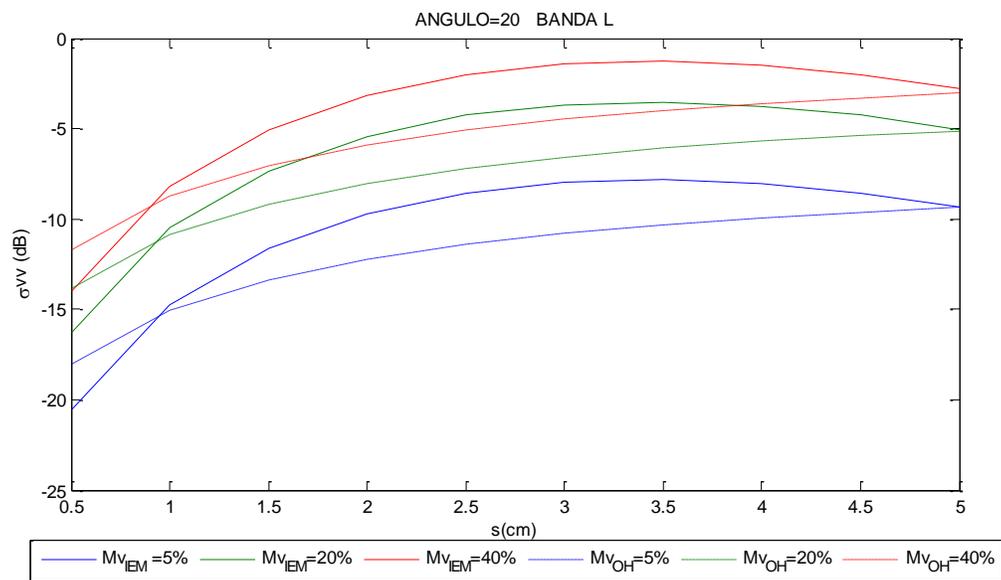


Figura 32: Curvas Funcionales modelos Oh e IEM, σ_{VV}^o vs rugosidad (cm) para 3 niveles de humedad superficial y ángulo de incidencia de 20°.

6. Ajuste del modelo IEM para Banda L

Al comparar las simulaciones del modelo de Oh y del modelo IEM se observa que, para los mismos parámetros de entrada, se predicen valores diferentes de salida (humedad y rugosidad). Esto es un problema si se quiere trabajar con estos modelos de manera independiente o combinados, de manera de poder utilizar lo mejor de cada modelo a la hora de calcular humedad de suelo, dado que su respuesta a los posibles errores instrumentales del sensor SAR es diferente a lo largo del rango angular. Mientras que el modelo IEM es muy sensible a los errores residuales de calibración del instrumento para ángulos de incidencia bajos y disminuye a lo largo del rango, el modelo de OH se mantiene constante en el mismo (Dadamia y Thibeault, 2009).

Dado que el modelo de Oh es semi-empírico y está basado en datos experimentales, se utilizará este modelo como “verdad de campo” tratando de acercar el modelo IEM al mismo con el fin de lograr que predigan valores de retrodispersión similares, minimizando el error, dentro del rango de validez de sus variables independiente, en la obtención del parámetro humedad del suelo.

Para lograr el acople de los mismos es necesario encontrar un parámetro de ajuste utilizando alguna de las variables contribuyentes del modelo IEM. Los parámetros del sensor como ser el ángulo de incidencia y longitud de onda son fijos, de las variables del blanco la humedad de suelo es la variable de interés, por lo que sólo quedan las variables de rugosidad (altura rsm y longitud de correlación) para encontrar el parámetro de ajuste. El otro problema que presenta el modelo IEM es que a la hora de invertirlo para la obtención de la variable de humedad se tiene: dos parámetros de entrada al modelo (la componente HH y VV de retrodispersión) y tres variables libres de salida (rugosidad, longitud de correlación y humedad). Esto hace necesario el establecer hipótesis sobre la variable de rugosidad o de la longitud de correlación para invertir el modelo y obtener sólo dos variables de salida.

En la bibliografía existen muchas formas funcionales de relacionar la rugosidad y la longitud de correlación, Su et al. (1997) fue el primero aplicar esta técnica utilizando IEM para obtener la pendiente de rugosidad S/l como parámetro eficaz. Baghdadi et al. (2002, 2004, 2006) calculó valores de longitud de correlación basado en el modelo IEM y mediciones de altura rsm. Además, encontró que valores efectivos de longitud de correlación para un mismo sitio varían significativamente para diferentes configuraciones de adquisiciones SAR, por lo que desarrolló ecuaciones empíricas para

relacionar l con parámetros de adquisición de la imagen, de modo tal que los suelos agrícolas desnudos pueden caracterizarse por dos parámetros de la superficie (altura rms y la humedad del suelo) en lugar de cuatro (altura rms, longitud de correlación, la función de autocorrelación y la humedad del suelo). Álvarez-Mozos et al. (2005, 2008) aplicó tanto el cociente s/l propuesto por Su et al. (1997), como las ecuaciones empíricas de Baghdadi et al (2006), en una cuenca agrícola de Navarra obteniendo resultados prometedores en la estimación de humedad de suelo (Lievens et al., 2011).

A su vez, varios autores han resaltado la dificultad de medir correctamente los parámetros de rugosidad, especialmente la longitud de correlación, mencionando que se requiere adquirir perfiles largos y con un intervalo de muestreo detallado (Baghdadi et al., 2002 - Davidson et al., 2003). Por lo que la posibilidad de estimar l a partir de valores de s resulta de gran interés, dado que la altura rsm es relativamente fácil de medir y no es tan sensible al intervalo de muestreo del perfilómetro empleado (Davidson et al., 2003).

Se propone entonces, incorporar la pendiente de rugosidad propuesta por Su et al. (1997) al modelo IEM, dicho parámetro debe cumplir la siguiente condición de validez $s/l < 0.4$. Se consideró que el cociente s/l es igual a un valor constante, lo que permite estimar empíricamente el valor de la longitud de correlación en función de la altura rsm. Thibeault y Dadamia (2009) analizaron el comportamiento del modelo IEM para relaciones s/l entre 0.0275 y 0.3569, donde $s/l = 0.055$ resultó ser un buen ajuste para banda L.

Se graficaron las diferencias absolutas entre el modelo de Oh y el modelo IEM sin ajustar para distintos ángulos y polarización HH/VV (Fig. 33). Se observa que la mínima diferencia en decibeles se da en la región de s/l cercana al 0.055 pero también permite inferir otros valores de s/l que podrían utilizarse para acoplar los modelos. Se propone también utilizar $s/l = 0.08$ para el modelo IEM y compararlo con el modelo de OH utilizando la expresión de la componente cross-polarizada que considera el parámetro de rugosidad s/l .

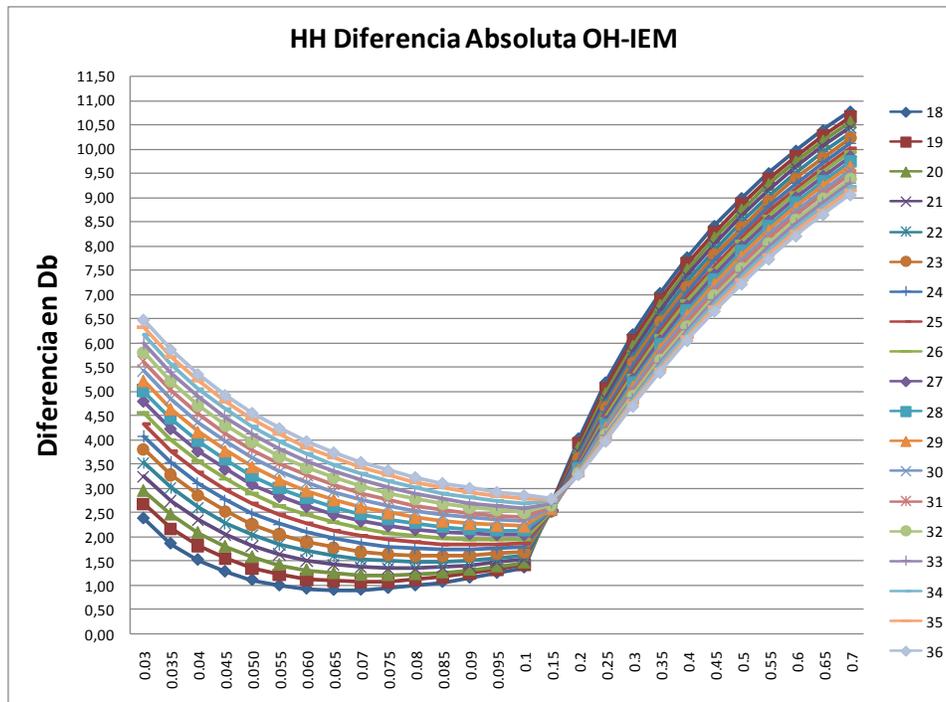


Figura 33: Diferencia absoluta, en decibels, entre el modelo Oh e IEM, para polarización HH y ángulos variables entre 18° y 36° (Thibeault y Dadamia, 2009).

6.1. Simulaciones del modelo IEM

El modelo IEM se corrió incorporando el parámetro s/l , para los dos casos de ajustes seleccionados en el apartado anterior. Se utilizaron para las simulaciones las funciones de autocorrelación gaussiana y exponencial y se observó que el valor del coeficiente de retrodispersión variaba con el tipo de función de autocorrelación utilizada. La correlación gaussiana corresponde a superficies rugosas mientras que la exponencial se relaciona a superficies con menor rugosidad, como suelen ser las áreas agrícolas de la Argentina dado que se utiliza el método de siembra directa. Gupta y Jangid (2011), en su estudio analizaron las variaciones del coeficiente de retrodispersión usando ambas funciones de autocorrelación con distintas combinaciones de rugosidad s y longitud de correlación l (Fig. 34).

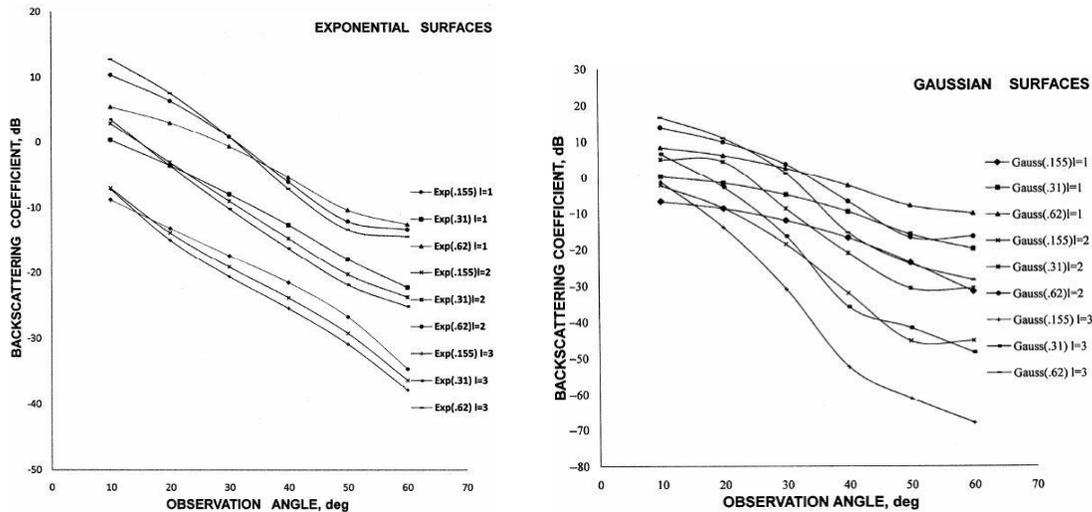


Figura 34: Variación σ_{hh}^o con el ángulo de incidencia para s/l (0.051, 0.0775, 0.103, 0.155, 0.2, 0.31, 0.62), para función autocorrelación exponencial (izq.) y función de autocorrelación gauseana (Gupta y Jangid, 2011).

Entre sus conclusiones destacan que el comportamiento del modelo IEM depende altamente de la función de autocorrelación seleccionada. De las gráficas se observa que para los casos de $s/l = 0.055$ y $s/l = 0.08$ el valor de retrodispersión obtenido para ángulos de incidencia mayor a 30° toma valores no físicos para la función de autocorrelación gaussiana, por lo tanto, de los resultados de la simulación con IEM sólo se utilizan los correspondientes a la función de autocorrelación exponencial.

6.2. Ajuste IEM con $s/l = 0.055$

Se realizó la comparación entre el modelo IEM con el ajuste $s/l=0.055$ y el modelo de Oh. Para ello se obtuvieron los rangos dinámicos de los modelos, es decir, el rango aproximado de variación total en decibelios entre el menor y mayor valor que toma el coeficiente de retrodispersión. Para la comparación se utilizó la versión de componente cross-polarizada del modelo de Oh representada en la ecuación 25 (tabla 8).

Parámetros	Modelo OH		Modelo IEM	
	HH	VV	HH	VV
Mv: 5%-40%	4.3	6.3	5.3	7.1
s: 0.5 cm - 5 cm	11.8	10.6	13.1	9.5
θ : 20° - 50° y $s=0.5$ cm	9.2	7	13.7	7.8
θ : 20° - 50° y $s=3.5$ cm	8.3	7	11.3	9.1

Tabla 8: Rangos Dinámicos Modelo de Oh y Modelo IEM con ajuste $s/l= 0.055$ en Banda L.

Se evaluaron las diferencias absolutas entre los modelos, para ello se calcularon las diferencias de estimación en todo el rango de valores de humedad, para un ángulo fijo y una rugosidad fija y luego se calculó el promedio de estas diferencias. Se trabajó con tres niveles de rugosidad: baja ($s=1$ cm), media ($s=3$ cm) y alta ($s= 5$ cm) y con ángulos entre 17° y 47° . La tabla 9 resume los promedios de diferencia absoluta del coeficiente de retrodispersión en decibeles obtenidos entre los modelos de Oh e IEM.

		Promedio de Diferencia Absoluta entre Modelos (dB)	
Rugosidad	θ	HH_IEM vs HH_OH	VV_IEM vs VV_OH
Baja $s= 1$ cm	17°	2.96	3.93
	27°	0.62	1.09
	37°	1.45	0.47
	47°	2.75	0.59
Media $s=3$ cm	17°	2.73	3.21
	27°	0.49	0.38
	37°	0.93	0.5
	47°	1.53	0.58
Alta $s= 5$ cm	17°	1.9	2.03
	27°	0.34	0.42
	37°	0.79	1.34
	47°	0.87	1.43

Tabla 9: Promedio Diferencia Absoluta del coeficiente de retrodispersión, en decibels, entre Modelo OH y Modelo IEM con ajuste $s/l=0.055$

Las diferencias de estimaciones entre los modelos varían entre 0.34 dB y 3.93 dB, por lo que se considera que el parámetro $s/l=0.055$, en el modelo IEM, ajusta bien. Las menores diferencias en cada uno de los niveles de rugosidad estudiados, tanto en la componente HH como en la VV, se obtuvieron usando un ángulo fijo de 27° (salvo para el caso de rugosidad baja, componente VV que el menor valor resultó con un ángulo fijo de 37°). En general, a medida que se incrementaron los niveles de rugosidad se obtuvieron menores diferencias absolutas de estimación de los modelos.

Las figuras 35-38 muestran la superposición de curvas funcionales de los modelos, donde se observa que para ambos modelos dichas curvas tienen la misma tendencia y además se aproximan una a la otra. En consecuencia, el parámetro de ajuste propuesto para el modelo IEM en banda L resulta satisfactorio.

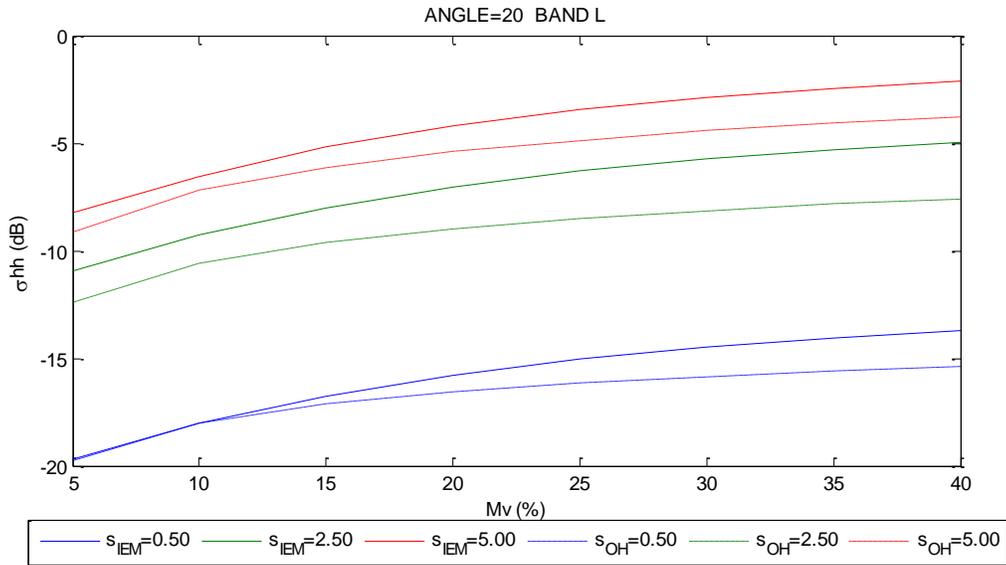


Figura 35: Curvas funcionales modelos Oh e IEM con $s/l=0.055$, σ_{HH}^o vs. Mv (%) para 3 niveles de rugosidad.

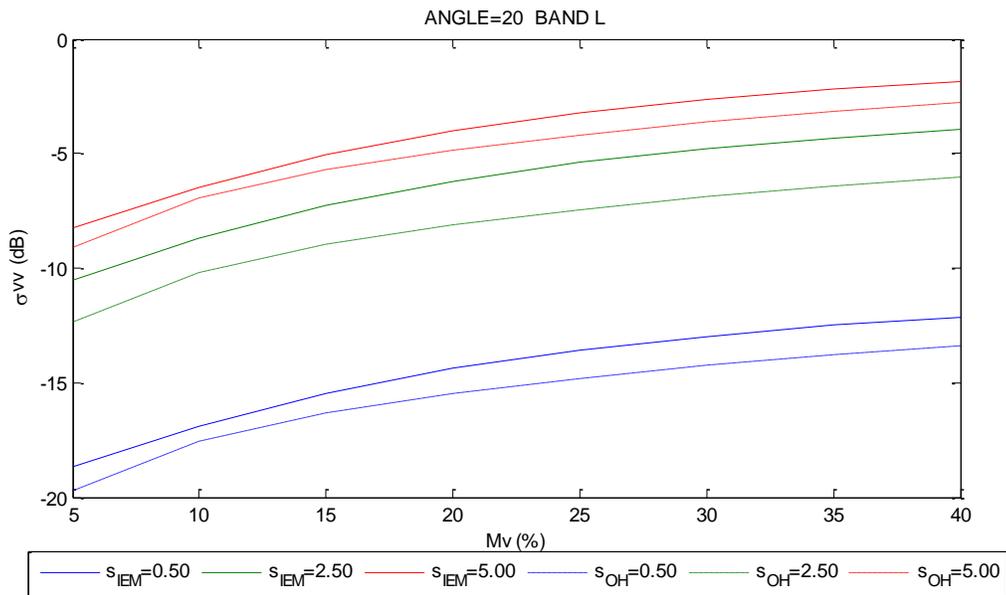


Figura 36: Curvas Funcionales modelos Oh e IEM con $s/l=0.055$, σ_{VV}^o vs. Mv (%) para 3 niveles de rugosidad.

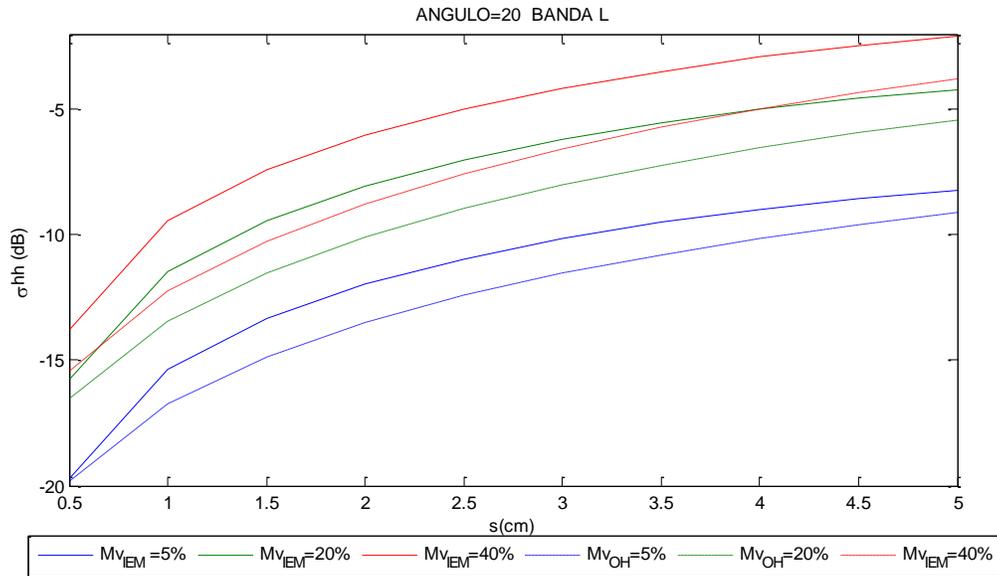


Figura 37: Curvas funcionales modelos Oh e IEM con $s/l=0.055$, σ_{HH}° vs s (cm.) para 3 niveles de humedad superficial.

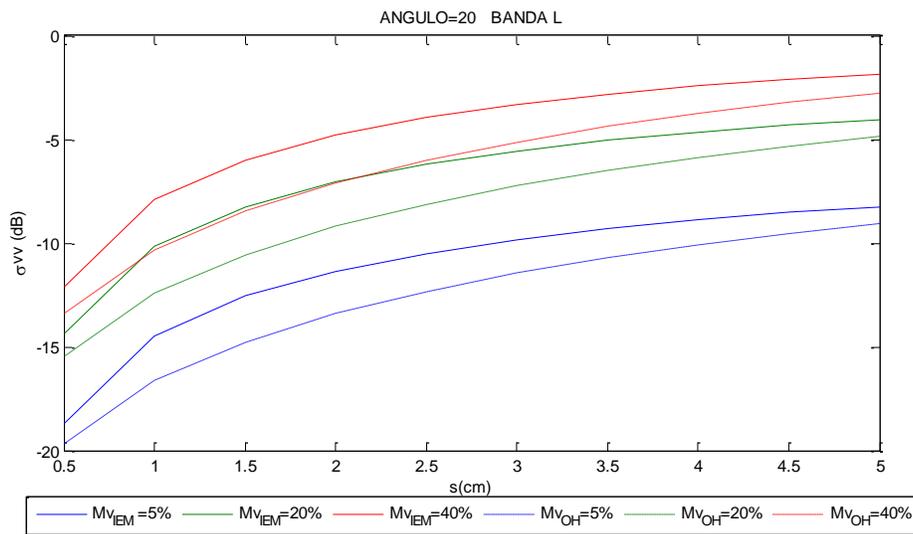


Figura 38: Curvas Funcionales modelos Oh e IEM con $s/l=0.055$, σ_{VV}° vs s (cm) para 3 niveles de rugosidad.

Se obtuvieron también gráficas que muestran la superposición de las simulaciones 3D de ambos modelos, entre 18° y 36° que es el rango angular con el que operará el SAR del SAOCOM en su modo TopSAR Wide QP, que se utilizará para el cálculo de humedad de suelo. En los gráficos se observan que las curvas funcionales de rugosidad y humedad de

suelo forman superficies las cuales se encuentran próximas para ángulos bajos; al aumentar el ángulo de incidencia se comienza a notar la separación entre ellas.

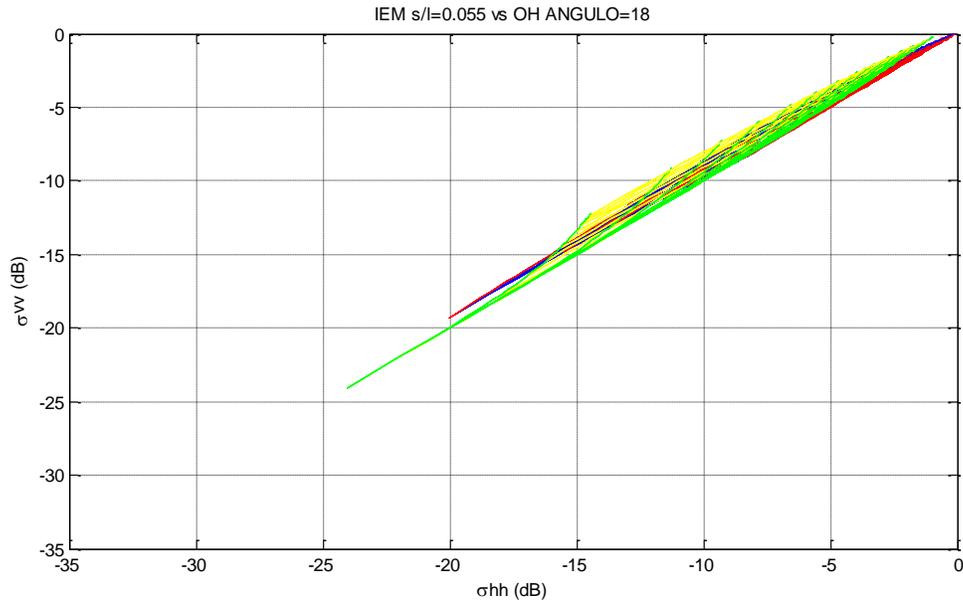


Figura 39: Simulaciones 3D de modelos Oh e IEM con $s/l=0.055$, para ángulo de incidencia de 18°

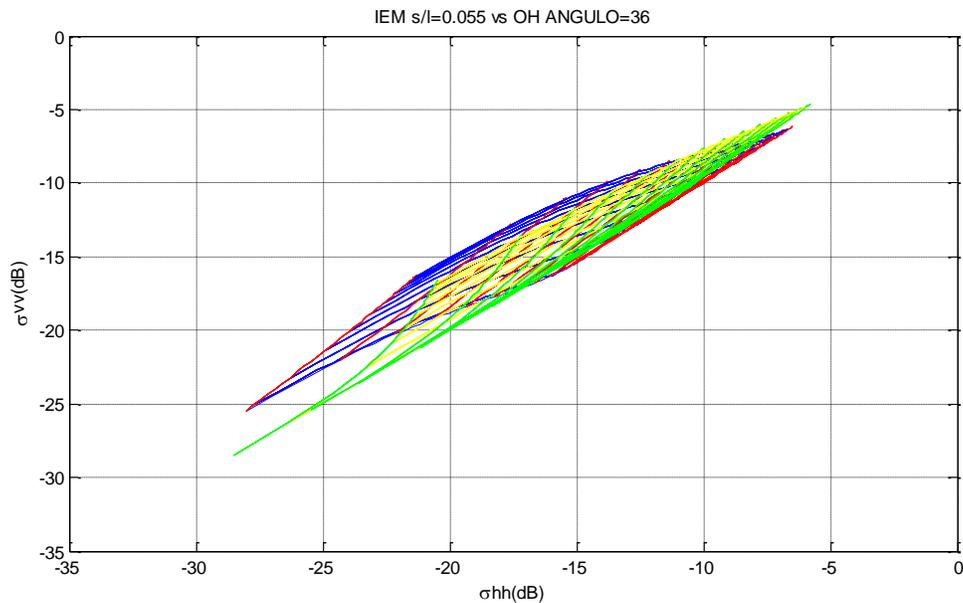


Figura 40: Simulaciones 3D de modelos Oh e IEM con $s/l=0.055$, para ángulo de incidencia de 36° .

Cabe señalar que, como se dijo anteriormente, esta aproximación sólo es válida para los ángulos de operación entre 18° y 36° , con ángulos fuera de este rango las curvas de los modelos muestran una mayor separación. A modo de ejemplo la figura 44 muestra la separación observada para un ángulo de incidencia de 50° .

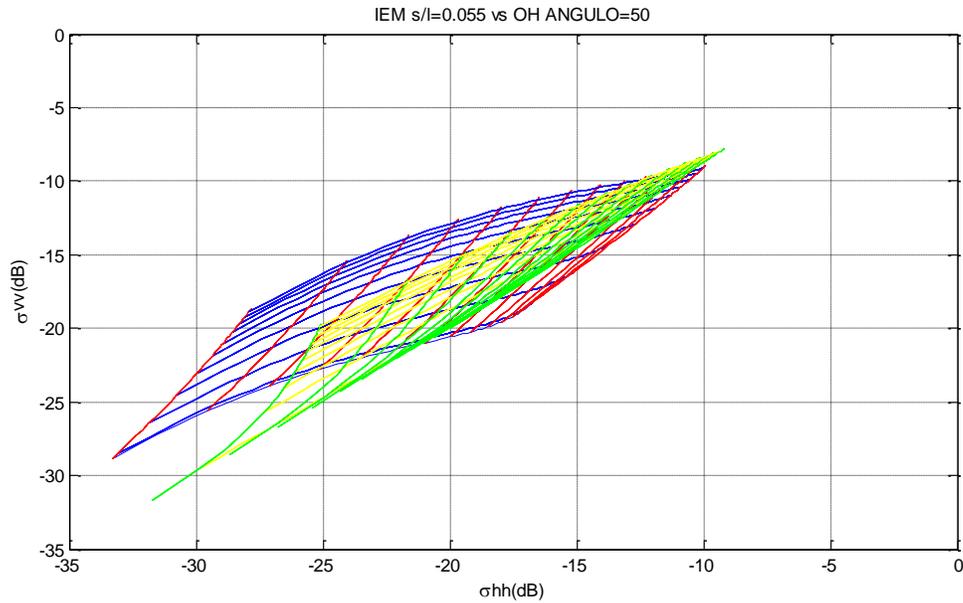


Figura 41: Simulaciones 3D de modelos Oh e IEM con $s/l=0.055$, para ángulo de incidencia de 50° .

6.3. Ajuste IEM con $s/l = 0.08$

Al igual que la sección 6.2, se realizó una comparación entre el modelo IEM con el parámetro $s/l=0.08$ y el modelo de Oh. Para la comparación se utilizó la versión de componente cross-polarizada del modelo de Oh representada en la ecuación 23 (tabla 10).

Parámetros	Modelo OH		Modelo IEM	
	Rango Dinámico (dB)		Rango Dinámico (dB)	
	HH	VV	HH	VV
Mv: 5%-40%	4.3	6.3	5.3	7.2
s: 0.5 cm - 5 cm	11.9	10.7	13.6	10
θ : 20° - 50° y $s=0.5$ cm	9.2	7	12.5	6.6
θ : 20° - 50° y $s=3.5$ cm	8.2	7	10.7	8.5

Tabla 10: Rangos Dinámicos Modelo de Oh y Modelo IEM con ajuste $s/l= 0.08$, en Banda L.

Para este ajuste, también se obtuvieron los promedios de las diferencias absolutas de estimación de los modelos, como se hizo en el caso del ajuste estudiado en la sección 6.2. Los resultados se encuentran resumidos en la tabla 11.

		Promedio de Diferencia Absoluta entre Modelos (dB)	
Rugosidad	θ	HH_IEM vs HH_OH	VV_IEM vs VV_OH
Baja s= 1 cm	17°	2.44	2.51
	27°	0.57	0.95
	37°	1.51	0.48
	47°	2.66	0.68
Media s= 3 cm	17°	2.25	2.08
	27°	0.44	0.30
	37°	0.95	0.45
	47°	1.40	0.52
Alta s=5 cm	17°	1.11	0.76
	27°	0.32	0.62
	37°	0.73	1.25
	47°	0.60	1.14

Tabla 11: Promedio Diferencia Absoluta entre Modelo OH y Modelo IEM con ajuste $s/l=0.08$

Para este ajuste, los promedios de diferencia absoluta del coeficiente de retrodispersión estimados de los modelos varían entre 0.32 dB y 2.66 dB, por lo que el ajuste $s/l=0.08$ resulta mejor que el $s/l=0.055$. Se repite el comportamiento descrito en la sección 6.2, los mínimos de diferencia absoluta, para ambas componentes se registran usando un ángulo de incidencia de 27°, independientemente del nivel de rugosidad. Salvo el caso de rugosidad baja y componente VV donde la menor diferencia absoluta se registra para un ángulo de 37°.

Las figuras 42-45 muestran la superposición de curvas funcionales de los modelos, donde se observa que para ambos modelos dichas curvas tienen la misma tendencia y además se aproximan una a la otra. En consecuencia, el parámetro de ajuste $s/l=0.08$ propuesto para el modelo IEM en banda L también resulta satisfactorio.

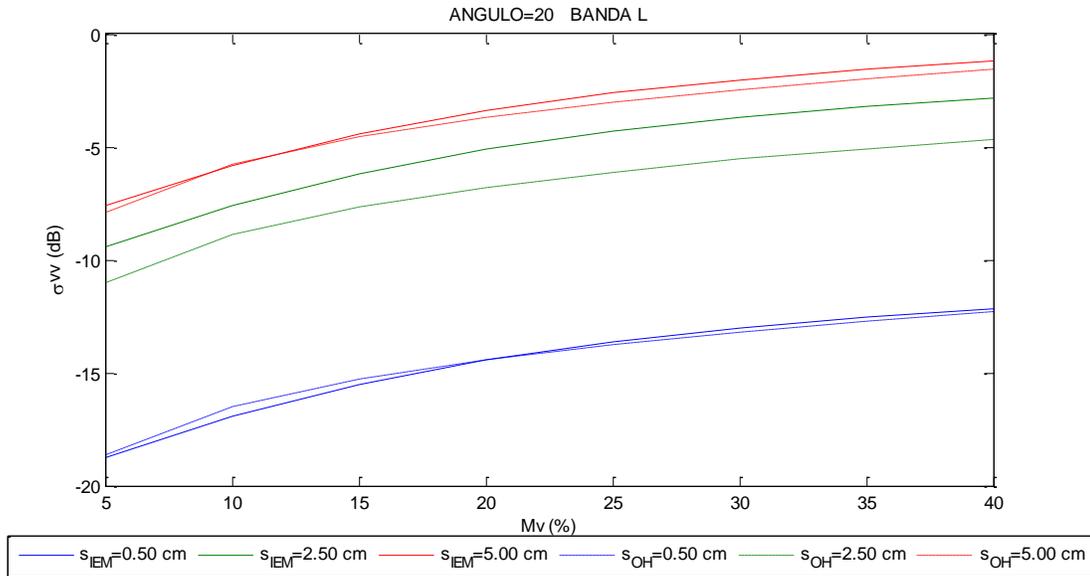


Figura 42: Curvas funcionales modelos Oh e IEM con $s/l=0.08$, σ_{VV}° vs. Mv (%) para 3 niveles de rugosidad.

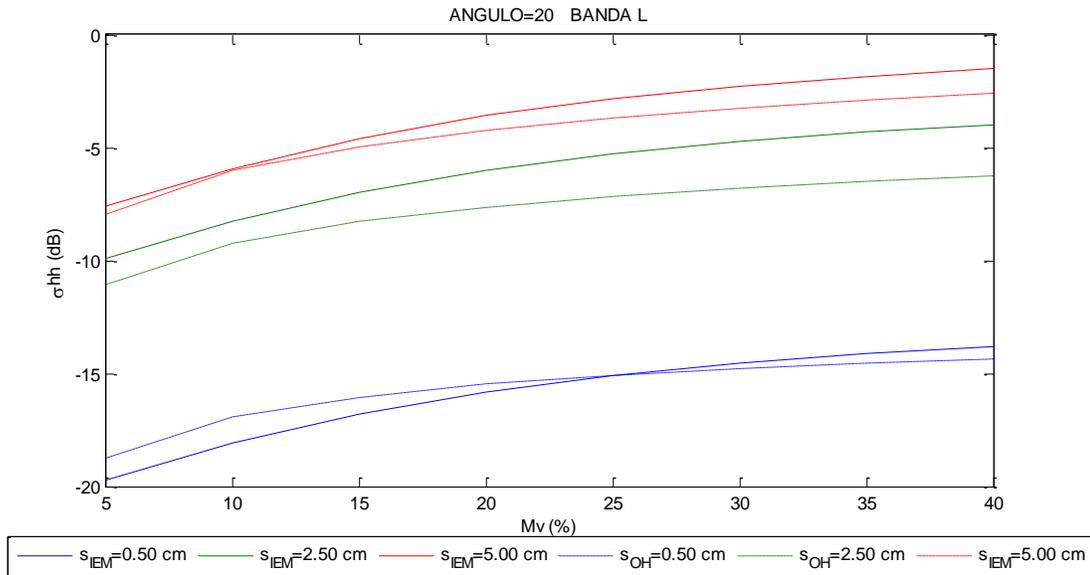


Figura 43: Curvas Funcionales modelos Oh e IEM con $s/l=0.08$, σ_{HH}° vs. Mv (%) para 3 niveles de rugosidad.

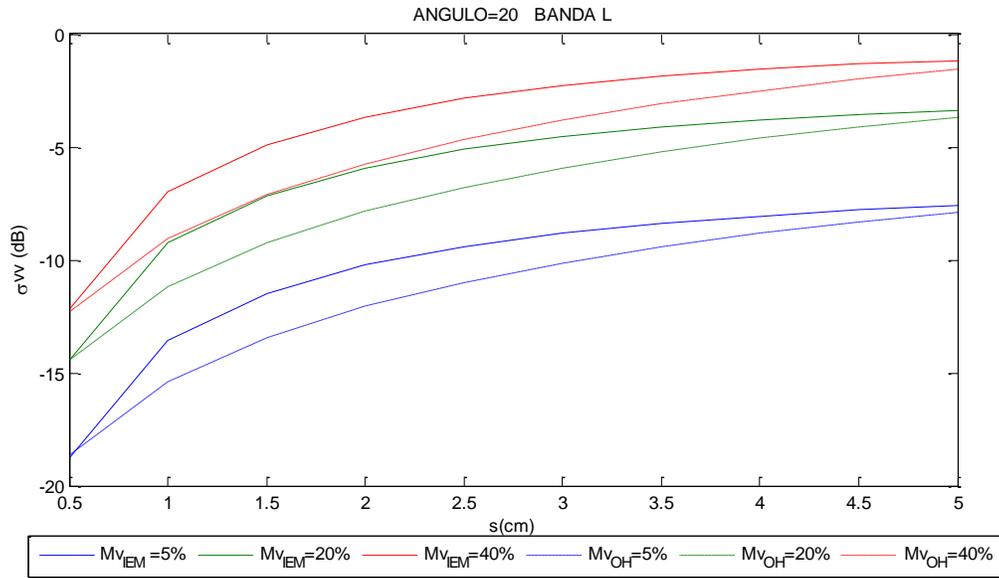


Figura 44: Curvas funcionales modelos Oh e IEM con $s/l=0.08$, σ_{VV}° vs s (cm.) para 3 niveles de humedad superficial.

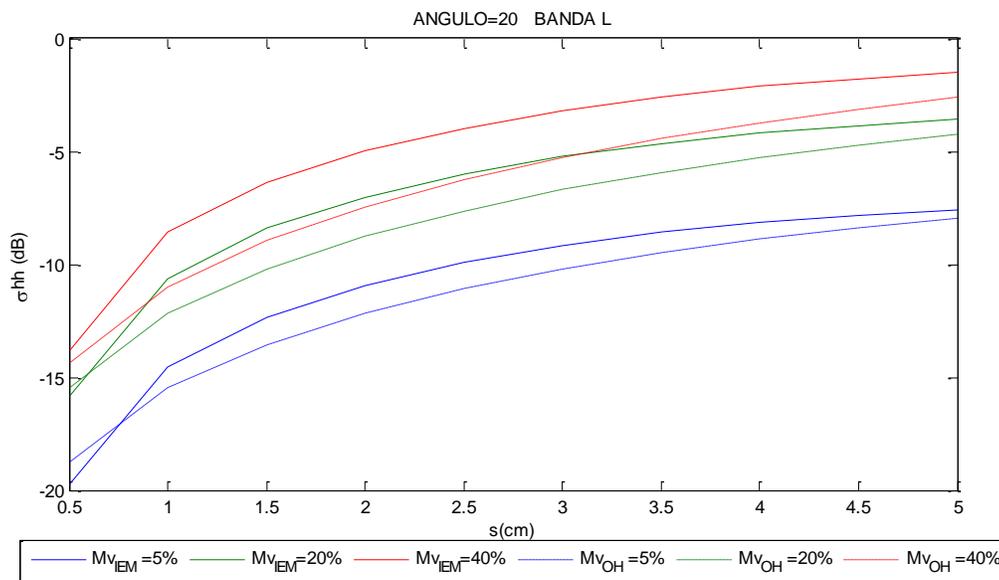


Figura 45: Curvas funcionales modelos Oh e IEM con $s/l=0.08$, σ_{HH}° vs s (cm.) para 3 niveles de humedad superficial.

Se obtuvieron también para este ajuste las superposiciones de la simulación 3D de los modelos, para los ángulos 18° y 36° y polarización HH (Fig.46 y Fig. 47). Al igual que en el caso $s/l=0.055$, las superficies se encuentran próximas para ángulos bajos y al aumentar el ángulo de incidencia se comienza a notar la separación entre las salidas de los modelos.

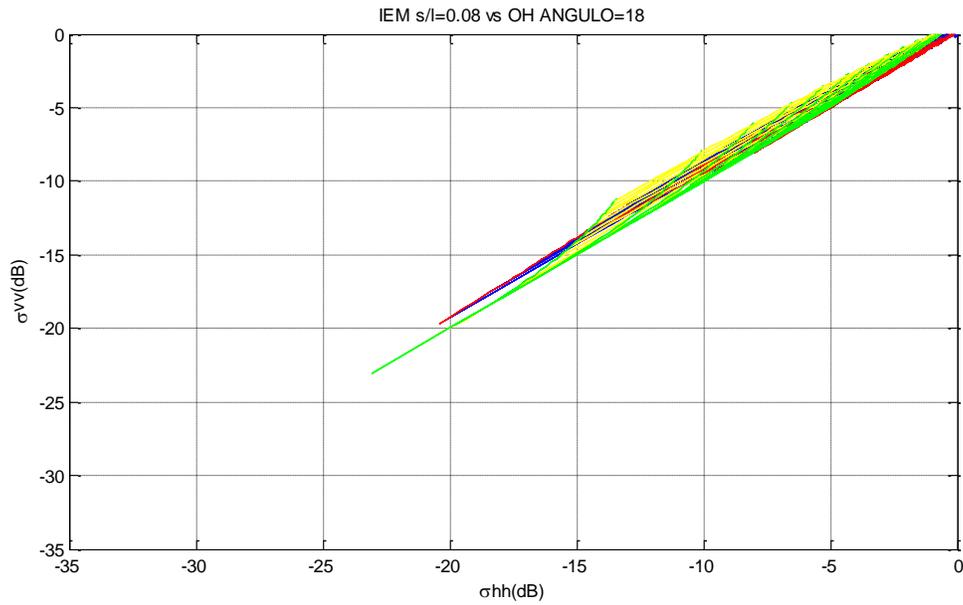


Figura 46: Simulaciones 3D de modelos Oh e IEM con $s/l=0.08$, para ángulo de incidencia de 18°

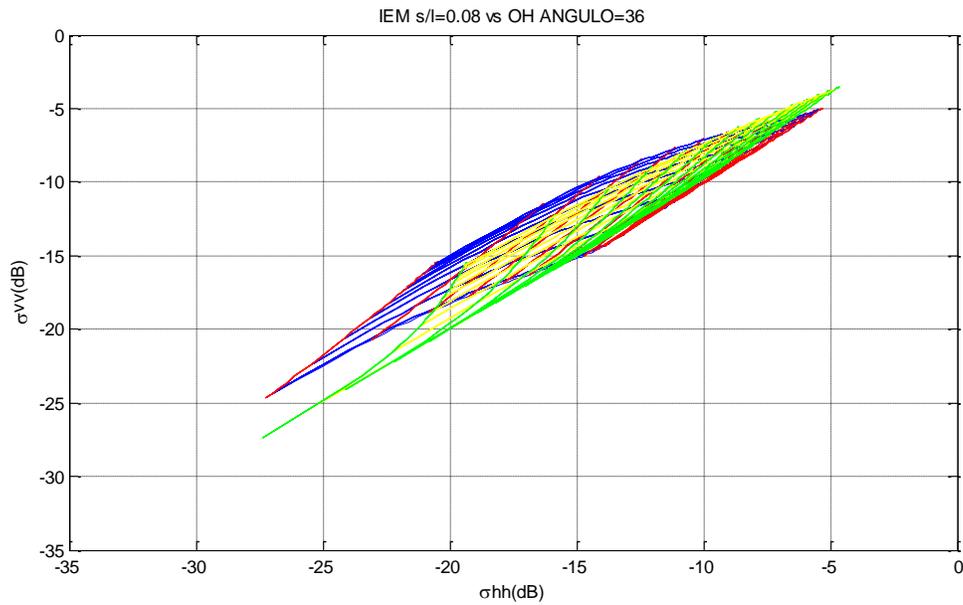


Figura 47: Simulaciones 3D de modelos Oh e IEM con $s/l=0.08$, para ángulo de incidencia de 36°

Este ajuste también sólo es válido para ángulos dentro del rango angular del modo TopSAR Wide QP del proyecto SAOCOM, que se utilizará en el cálculo de humedad de suelo, ya que nuevamente se observa que por ejemplo ángulos mayores las curvas se separan.

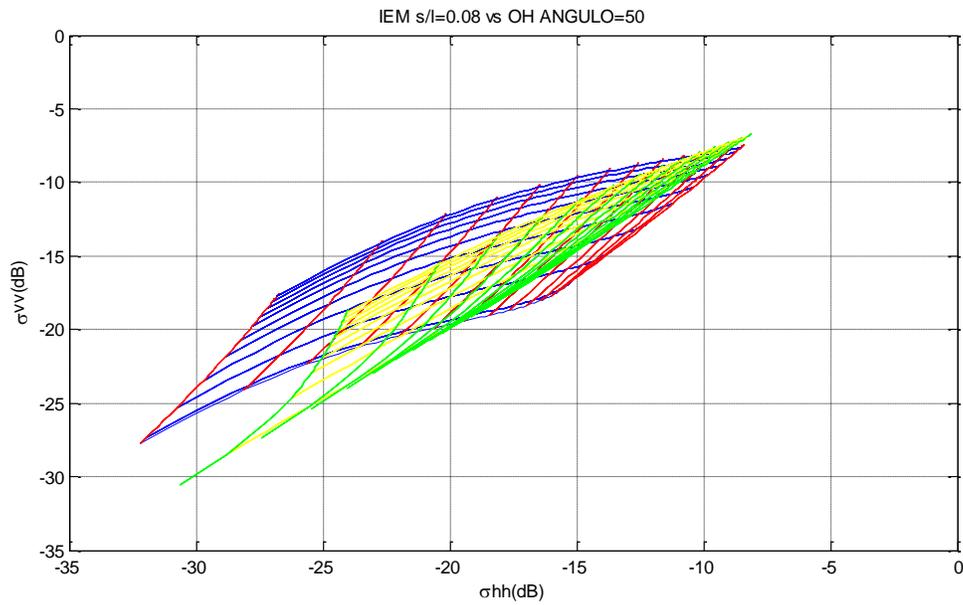


Figura 48: Simulaciones 3D de modelos Oh e IEM con $s/l=0.08$, para ángulo de incidencia de 50°

7. Validación en imágenes SAR para Banda L

Con el objetivo de validar los ajustes para los modelos electromagnéticos de humedad de suelo a suelo desnudo descritos anteriormente, se procede a obtener mapas de humedad de suelo utilizando imágenes ALOS-PALSAR, SARAT y UAVSAR. En el Anexo B se describen brevemente las principales características de las misiones anteriormente mencionadas.

7.1. Imágenes utilizadas

Se cuenta con un set de datos compuesto por imágenes provenientes de diferentes sensores SAR en banda L, fechas y regiones dentro del área de interés del proyecto SAOCOM, la región pampeana. Esta región fue considerada por el proyecto SAOCOM por ser la región agrícola-ganadera por excelencia y comprende los límites políticos de las provincias de Córdoba, Santa Fe, Buenos Aires, Entre Ríos y la Pampa. Para esta región se procesaron:

- a) ALOS-PALSAR, 11 imágenes sobre la Prov. de Buenos Aires, 5 sobre la Prov. de Córdoba, 2 sobre la Prov. de Entre Ríos, 3 sobre la Prov. de La Pampa y 4 sobre la Prov. de Santa Fe (Fig. 49).
- b) SARAT, 19 imágenes sobre la zona de Bell Ville Prov. de Córdoba (Fig. 50).
- c) UAVSAR, 2 imágenes divididas en 18 frames sobre la zona de Bell Ville Prov. de Córdoba (Fig. 51).

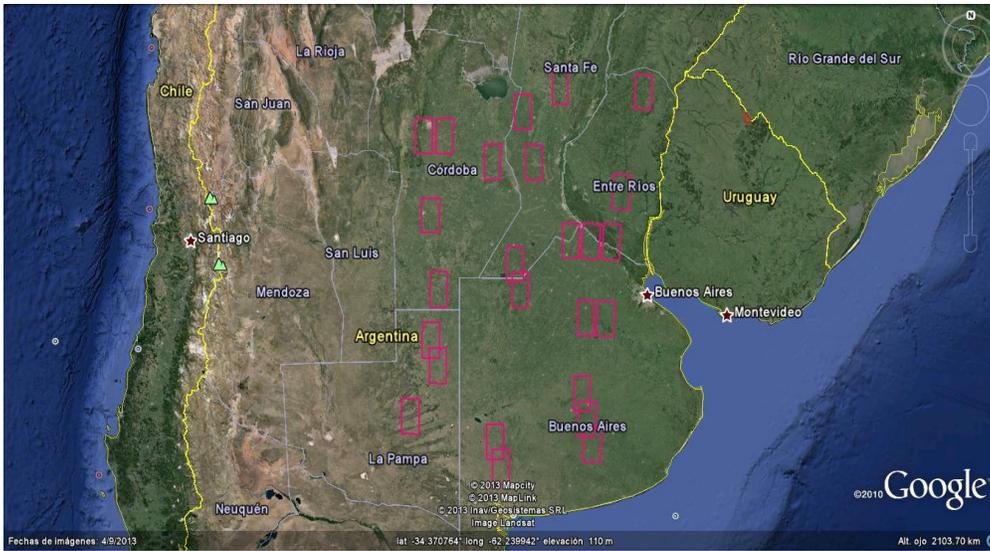


Figura 49: Áreas de estudio imágenes ALOS-PALSAR



Figura 50: Áreas de estudio imágenes SARAT



Figura 51: Áreas de estudio imágenes UAVSAR

7.1.1 Imágenes ALOS PALSAR

Se procesaron 25 imágenes Alos –Palsar Quad-Pol product:

- Nivel de Procesamiento: 1.5 (imágenes georreferenciadas)
- Imagen procesada con Multi-look (4 looks) y con proyección cartográfica
- Modo: PLR: HH/HV/VV/VH
- Tamaño del Pixel: 12.5m

A continuación se detallan las imágenes utilizadas en este procesamiento

Imagen	Fecha	Provincia
A17403_3_A3_20626	12/08/2009	Buenos Aires
A17412_1_A3_20626	12/08/2009	Buenos Aires
A17412_4_A3_20203	09/11/2009	Buenos Aires
A17412_5_A3_20203	09/11/2009	Buenos Aires
A17412_3_A3_20276	14/11/2009	Buenos Aires
A21966_1_A3_20349	19/11/2009	Buenos Aires
A17403_7_A3_20349	19/11/2009	Buenos Aires
A17403_6_A3_20378	21/11/2009	Buenos Aires
A16880_13_A3_20451	26/11/2009	Buenos Aires
A16880_14_A3_20451	26/11/2009	Buenos Aires
A21966_1_A3_20451	26/11/2009	Buenos Aires
A15255_6_A3_20101	11/02/2009	Córdoba
A17403_4_A3_20597	12/06/2009	Córdoba
A21968_3_A3_20276	14/11/2009	Córdoba

A15255_5_A3_20349	19/11/2009	Córdoba
A21968_1_A3_25717	22/11/2010	Córdoba
A21967_2_A3_20130	04/11/2009	Entre Ríos
A21967_1_A3_20305	16/11/2009	Entre Ríos
A17403_8_A3_20174	11/07/2009	La Pampa
A21970_1_A3_20174	07/11/2009	La Pampa
A17403_1_A3_20670	11/12/2009	La Pampa
A17403_2_A3_20626	12/08/2009	Santa Fe
A17412_2_A3_20276	14/11/2009	Santa Fe
A21969_1_A3_20451	26/11/2009	Santa Fe
A21969_2_A3_20451	26/11/2009	Santa Fe

Tabla 12: Imágenes ALOS PALSAR usadas para el análisis

7.1.2 Imágenes SARAT

Se procesaron 19 imágenes SARAT en formato GRD de la zona de Bell Ville provincia de Córdoba:

- Nivel de Procesamiento: 1B
- Datos de intensidad multi-look, proyectados a tierra, calibrados radiométricamente y georreferenciados.
- .Componentes HH/HV/VV/VH
- Tamaño pixel: 4.73 metros

Imagen	Fecha	Provincia
W709T21981263.0	26/03/13	Córdoba
W709T21981263.2	26/03/13	Córdoba
W709T21981263.3	26/03/13	Córdoba
W709T21999163.0	26/03/13	Córdoba
W709T21999163.1	26/03/13	Córdoba
W709T21999163.2	26/03/13	Córdoba
W709T21999163.3	26/03/13	Córdoba
W709T22017163.0	26/03/13	Córdoba
W709T22017163.2	26/03/13	Córdoba
W709T22017163.3	26/03/13	Córdoba
W709T22053163.1	26/03/13	Córdoba
W709T22053163.2	26/03/13	Córdoba
W709T21981263.1	16/05/13	Córdoba
W709T22017163.1	16/05/13	Córdoba

W709T22035163.0	16/05/13	Córdoba
W709T22035163.1	16/05/13	Córdoba
W709T22035163.2	16/05/13	Córdoba
W709T22035163.3	16/05/13	Córdoba
W709T22053163.0	16/05/13	Córdoba

Tabla 13: Imágenes SARAT usadas para el análisis

7.1.3 Imágenes UAVSAR

Se procesaron 18 imágenes UAVSAR en formato GDR de la zona de Bell Ville provincia de Córdoba:

- Nivel de Procesamiento: Ground projected.
- Datos de intensidad multi-look, proyectados a ground range, calibrados radiométricamente y georreferenciados.
- Componentes HH/HV/VV/VH

Imagen	Fecha	Provincia
BELL-VILLE-000.1	26/03/13	Córdoba
BELL-VILLE-000.2	26/03/13	Córdoba
BELL-VILLE-000.3	26/03/13	Córdoba
BELL-VILLE-000.4	26/03/13	Córdoba
BELL-VILLE-000.5	26/03/13	Córdoba
BELL-VILLE-000.6	26/03/13	Córdoba
BELL-VILLE-000.7	26/03/13	Córdoba
BELL-VILLE-000.8	26/03/13	Córdoba
BELL-VILLE-000.9	26/03/13	Córdoba
BELL-VILLE-001.1	26/03/13	Córdoba
BELL-VILLE-001.2	26/03/13	Córdoba
BELL-VILLE-001.3	26/03/13	Córdoba
BELL-VILLE-001.4	26/03/13	Córdoba
BELL-VILLE-001.5	26/03/13	Córdoba
BELL-VILLE-001.6	26/03/13	Córdoba
BELL-VILLE-001.7	26/03/13	Córdoba
BELL-VILLE-001.8	26/03/13	Córdoba
BELL-VILLE-001.9	26/03/13	Córdoba

Tabla 14: Imágenes UAVSAR usadas para el análisis

7.2. Procesamiento de las imágenes

Para poder realizar un análisis cuantitativo de las imágenes se procedió a realizar una serie de pasos preliminares, utilizando el *software* Matlab:

- **Conversión a GeoTIFF:** se convirtieron las imágenes en formato CEOS a geotiff para poder ser analizadas por el software.
- **Calibración Absoluta:** para las imágenes ALOS PALSAR la calibración absoluta se realizó usando los valores propuestos en la especificación de Productos ALOS PALSAR. Se empleó la siguiente ecuación donde, $K = -83$ dB es la constante de calibración.

$$\sigma = (DN^2) * (10^{K/10}) \quad (35)$$

Las imágenes SARAT se reciben calibradas desde la estación de procesamiento que las distribuye. Las imágenes UAVSAR vienen con la matriz de Stokes calibrada y proyectada en tierra.

- **Box Filter:** se aplicó un filtro de media con el fin de reducir el ruido speckle en las imágenes. Para imágenes ALOS PALSAR el box filter usado fue de 10x10, mientras que para SARAT y UAVSAR fue de 5x5.
- **Ángulos:** se calcularon los ángulos de incidencia local asumiendo terreno plano con referencia a la altura elipsoide del satélite y el ángulo fuera del nadir y latitud en el centro de la imagen. Se calcularon los ángulos de incidencia por pixel para invertir los modelos. La variación angular no excede de 3 ° para toda la escena.
- **Mapas:** se generaron los siguientes mapas en formato geotiff
 - Humedad de suelo para dos modelos: OH e IEM.
 - Radar Vegetation Index (RVI)
 - Rugosidad para dos modelos: OH e IEM
- **Áreas:** en cada imagen de cada sensor se seleccionaron al azar 5 regiones de interés y se calculó para cada una de ellas: área, ángulo de incidencia promedio, promedio humedad de suelo y promedio rugosidad de suelo para cada modelo.
- **Pasaje planilla de cálculo:** Toda la información procesada fue guardada en planillas de cálculo para ser analizada

7.3. Hipótesis de Trabajo

En aquellas imágenes donde no se contaba con información de campo, se trabajó bajo la hipótesis de suelo desnudo, es decir pedir que:

- El cociente de los coeficientes de retrodispersión de las componentes copolarizadas HH y VV en la imagen, debe ser menor que uno ($HH/VV < 1$) calculado en potencia. Si el cálculo es en decibeles, esta diferencia tiene que ser menor que cero ($HH(dB) - VV(dB) < 0$ dB) (Dubois et al. 1995).
- El cociente entre la componente cross-polarizada (HV o VH) y la componente copolarizada VV debe ser menor a 11 dB (Dubois et al. 1995) o pedir que el Radar Vegetation Index sea menor o igual a 0.4.

7.4. Calculo de Radar Vegetation Index

Como se mencionó en el párrafo anterior se necesita discriminar suelo desnudo de vegetación en aquellas imágenes donde no se cuenta con datos de campo (en particular para el trabajo con imágenes ALOS PALSAR). Para ello se calculó el Índice de Vegetación Radar (RVI) para cada imagen, este índice fue propuesto por Van Zyl y Kim en el año 2004 y se calcula utilizando la componente cross-polarizada y co-polarizada como muestra la siguiente ecuación:

$$RVI = \frac{8 \sigma_{HV}^{\circ}}{\sigma_{VV}^{\circ} + \sigma_{HH}^{\circ} + 2 \sigma_{HV}^{\circ}} \quad (36)$$

El RVI varía entre cero y uno, los valores cercanos a cero denotan suelos desnudos y de superficie suave.

7.5. Calculo de Mapas de Humedad de suelo y Rugosidad superficial

El siguiente paso consistió en la creación de dos tipos de mapas para cada una de las imágenes, por un lado mapas de humedad de suelo y por otro lado mapas de rugosidad superficial de suelo. Para ello se procede a invertir los modelos electromagnéticos directos de Oh e IEM, con los dos ajustes analizados previamente ($s/l=0.055$ y $s/l=0.08$), mediante la generación de una *Look Up Table* (LUT). El método de inversión consiste en tomar tablas generadas por los modelos directos y relacionar los parámetros polarimétricos de la imagen con lo que predicen los modelos. Es decir, se genera una tabla de doble entrada (Fig. 52) donde se relacionan vía los modelos, la humedad y

rugosidad con HH y VV, a cada combinación lineal de las mismas, para cada ángulo de incidencia local de un sensor SAR dado, para un longitud de onda determinada (en este caso es Banda L).

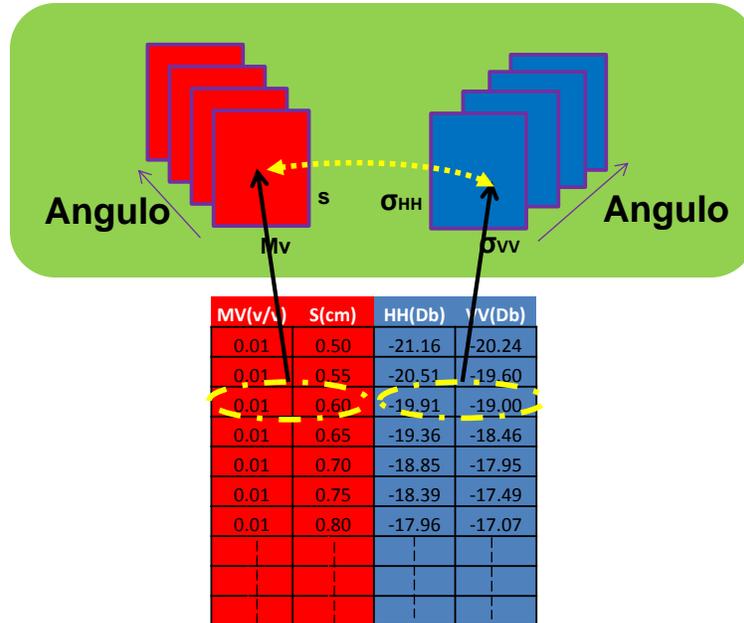


Figura 52: Ejemplo de una Look Up Table (LUT)

El siguiente esquema resume el procedimiento metodológico realizado para el cálculo de mapas de humedad de suelo y rugosidad superficial, donde a la imagen calibrada se le pasa un filtro de media y se calcula el radar vegetation Index. Con la imagen calibrada, junto con el RVI y el mapa de ángulos de incidencia se arma un árbol de decisión que permite separar (bajo las hipótesis de trabajo descritas en la sección 8.3) los pixeles que no se procesan y se enmascaran de la imagen. Luego usando las Look Up Table se obtienen los mapas de humedad y rugosidad de suelo.

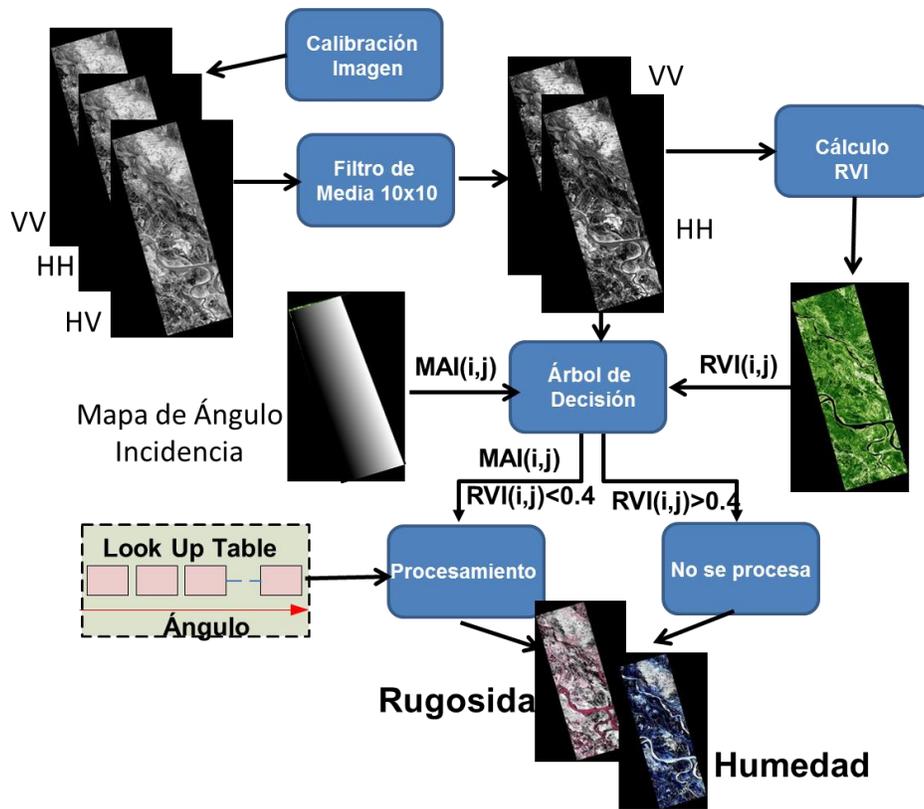


Figura 53: Diagrama de flujo del procedimiento implementado para obtención de mapas de humedad y rugosidad

A continuación se muestran algunos mapas obtenidos para los distintos sensores, para el caso de los mapas de humedad el rango de valores va desde un 0% hasta un 40% de M_v mientras que el de rugosidad varía de 0 a 7 cm. El color negro corresponde a una máscara que se realizó en aquellos lugares donde RVI es demasiado alto para ser suelo desnudo y se enmascaró con cero

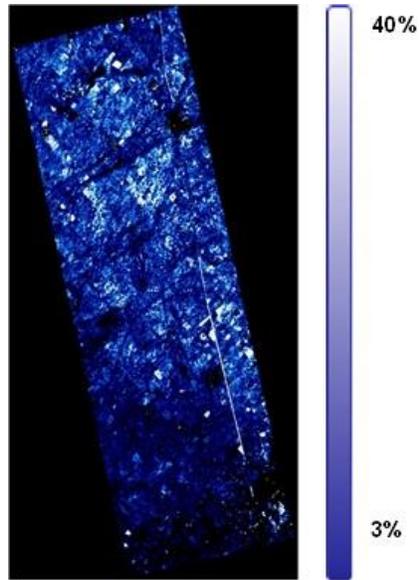


Figura 54: Mapa de Humedad de Suelo (%) Prov. Buenos Aires, Modelo IEM ajuste $s/l=0.08$, ALOS PALSAR.

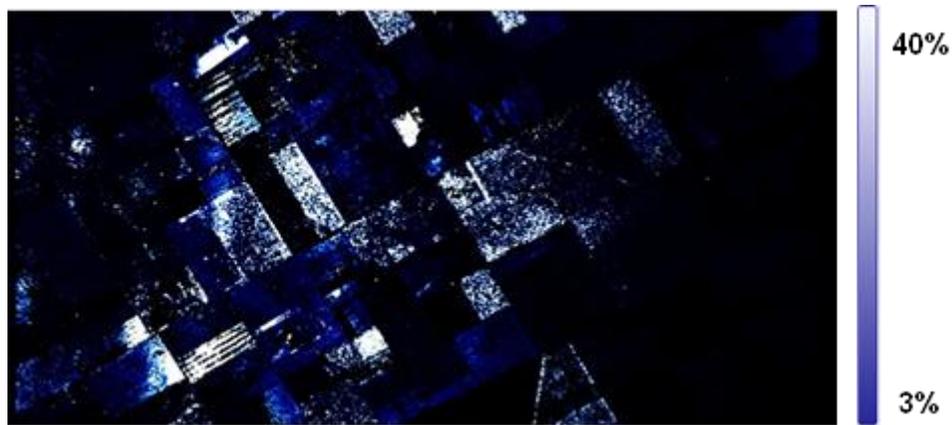


Figura 55: Mapa de Humedad de Suelo (%) Prov. Córdoba, Modelo OH, SARAT.



Figura 56: Mapa de Rugosidad Superficial del suelo (cm), Prov. Córdoba, Modelo IEM ajuste $s/l=0.055$, UAVSAR.

7.6. Extracción de Estadísticas de los Mapas y Comparación de Resultados

Con los mapas de humedad y rugosidad de suelo creados se procedió a tomar áreas de interés al azar de cada una de las imágenes, bajo las condiciones de suelo desnudo explicadas en la sección 8.3. Para dichas áreas se calculó la media de las estimaciones de humedad de suelo y rugosidad superficial del suelo de modo de comparar las estimaciones del modelo OH con los dos ajustes del modelo IEM.

Además se calculó la diferencia media absoluta de los modelos para poder determinar cuál de los dos ajustes del modelo IEM ($s/l= 0.055$ o $s/l= 0.08$) resultaba mejor.

7.6.1 Imágenes ALOS PALSAR

Para el caso de ALOS-PALSAR se contó con un total de 25 imágenes y se trabajó con la estimación media de humedad de suelo y rugosidad a nivel provincia para calcular la diferencia media absoluta entre los modelos. Se seleccionaron 5 regiones de interés para cada imagen, en la tabla 15 se detallan el tamaño de área promedio (en cantidad de píxeles) seleccionado para cada provincia. El tamaño promedio de las regiones de interés varía por provincia dado que en las regiones donde se tomó el área estaban bajo la hipótesis de suelo desnudo

	Área
Buenos Aires	108059
Córdoba	62697
Entre Ríos	53784
La Pampa	58227
Santa fe	80067

Tabla 15: Tamaño promedio del área de interés seleccionado para cada provincia

En la tabla 16 se muestran los resultados obtenidos para estimación de humedad de suelo y en la tabla 17 los correspondientes para rugosidad superficial de suelo.

Diferencia Media Absoluta entre Modelos - Estimación Mv (%)		
	OH vs IEM (s/l=0.055)	OH vs IEM (s/l=0.08)
Buenos Aires	1.64	2.06
Córdoba	2.39	2.44
Entre Ríos	2.39	1.69
La Pampa	2.11	3.7
Santa fe	1.92	2.1

Tabla 16: Estimaciones de Humedad de Suelo, diferencia media absoluta entre los modelos, imágenes ALOS-PALSAR.

Diferencia Media Absoluta entre Modelos - Estimación rugosidad (cm)		
	OH vs IEM (s/l=0.055)	OH vs IEM (s/l=0.08)
Buenos Aires	0.33	0.14
Córdoba	0.38	0.27
Entre Ríos	0.44	0.24
La Pampa	0.14	0.31
Santa fe	0.23	0.19

Tabla 17: Estimaciones de Rugosidad superficial de Suelo, diferencia media absoluta entre los modelos, imágenes ALOS-PALSAR.

Analizando la tabla 16 se observa que las diferencias absolutas de los modelos varían entre 1.64 % y 2.39 % para el caso de IEM con el ajuste $s/l=0.055$, mientras que para el ajuste $s/l=0.08$ las diferencias de estimaciones varían entre 1.69% y 3.7 %. La menor diferencia media absoluta para el ajuste $s/l=0.08$ se dio en el caso de las imágenes analizadas de la provincia de Entre Ríos, mientras que en la provincia de La Pampa se obtuvo la mayor diferencia de estimaciones de humedad de suelo entre el modelo de OH e IEM. Para el caso de OH vs IEM con $s/l=0.055$ la menor diferencia media absoluta se obtuvo para el caso de la provincia de Buenos Aires y en la provincia de Entre Ríos se obtuvo la mayor diferencia media absoluta.

En el caso de las estimaciones de rugosidad superficial usando ALOS-PALSAR, los rangos varían de 0.14 cm a 0.44 cm para OH vs. IEM con ajuste $s/l=0.055$ y de 0.14 cm a 0.31 cm para el ajuste $s/l=0.08$. En esta ocasión la mínima diferencia media absoluta de las estimaciones se obtuvieron en La Pampa para el primer ajuste y en la provincia de Buenos Aires para el segundo ajuste; las máximas diferencias en cambio se tuvieron en Entre Ríos y en La Pampa.

A continuación se muestran a modo de ejemplo las gráficas obtenidas a nivel provincia, para los casos de Entre Ríos y La Pampa. Para ello se seleccionó una imagen al azar de

cada provincia y se tomaron 10 áreas de interés. El tamaño promedio de área seleccionada en el caso de la provincia de Entre Ríos es de 15952 píxeles y para La Pampa de 25690 píxeles.

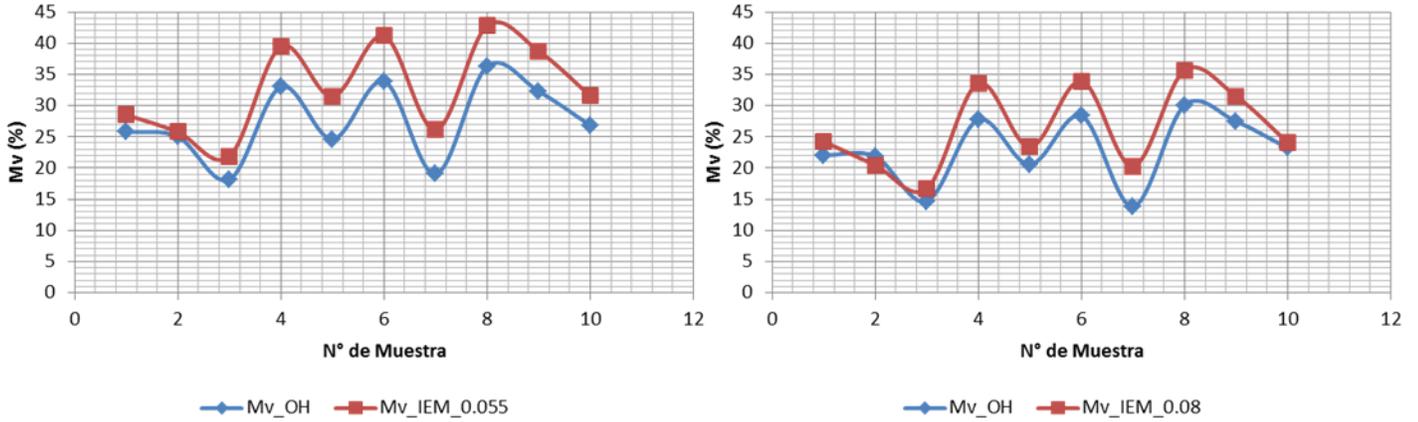


Figura 57: Estimación de humedad de suelo (%) para áreas de interés seleccionadas; imagen de la Prov. de Entre Ríos.

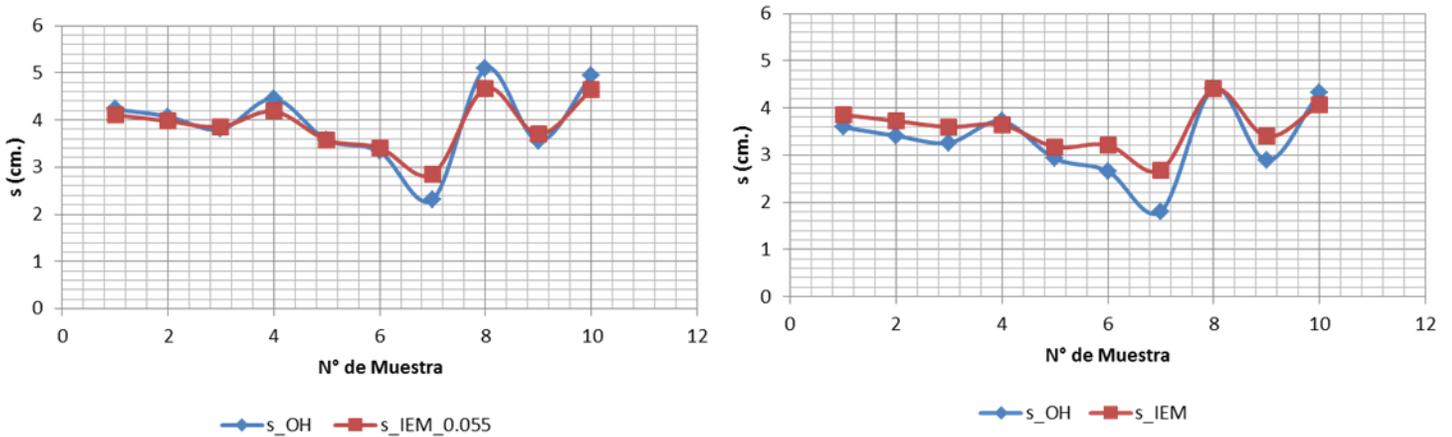


Figura 58: Estimación de rugosidad superficial de suelo (cm) para áreas de interés seleccionadas; imagen de la Prov. de La Pampa.

En los siguientes gráficos de puntos se representaron todas las estimaciones obtenidas de humedad de suelo de las áreas de interés seleccionadas para la Región Pampeana.

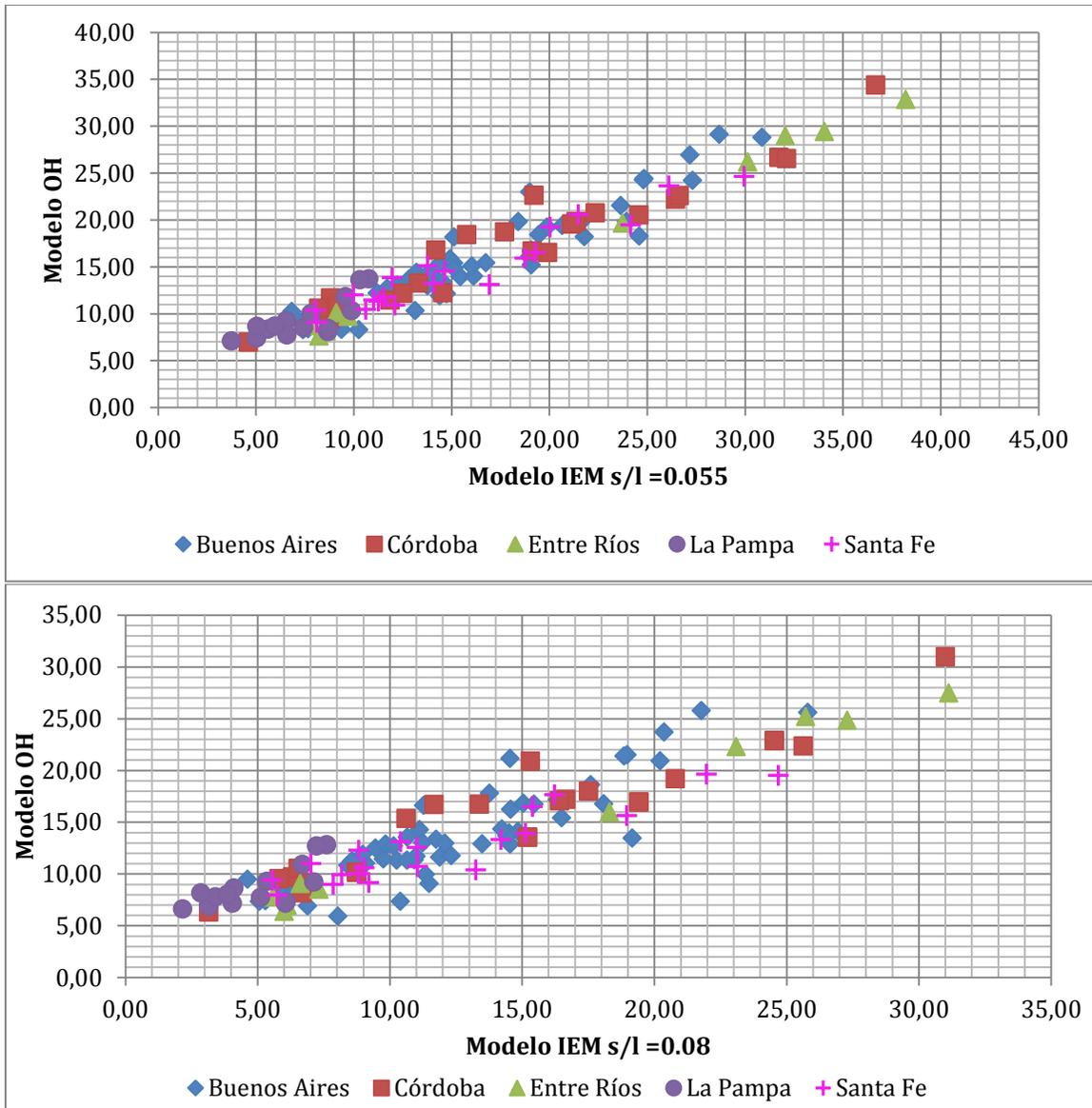


Figura 59: Estimación de humedad de suelo (%), imágenes ALOS PALSAR: (a) Modelo OH vs Modelo IEM ajuste s/l=0.055, (b) Modelo OH vs Modelo IEM ajuste s/l=0.08.

Se observa que para el caso OH vs IEM con s/l=0.08 hay mayor dispersión de las estimaciones, sobre todo a valores por encima del 15 % de humedad. Se realizó una regresión lineal simple al conjunto de datos y se obtuvo que ambos ajustes resultan buenos, pero el caso del ajuste s/l=0.055 resulta mejor, ya que presenta un coeficiente de determinación $R^2 = 0.93$, mientras que del ajuste s/l=0.08 al compararlo con las estimaciones del modelo OH se obtuvo $R^2 = 0.86$ (Fig. 60).

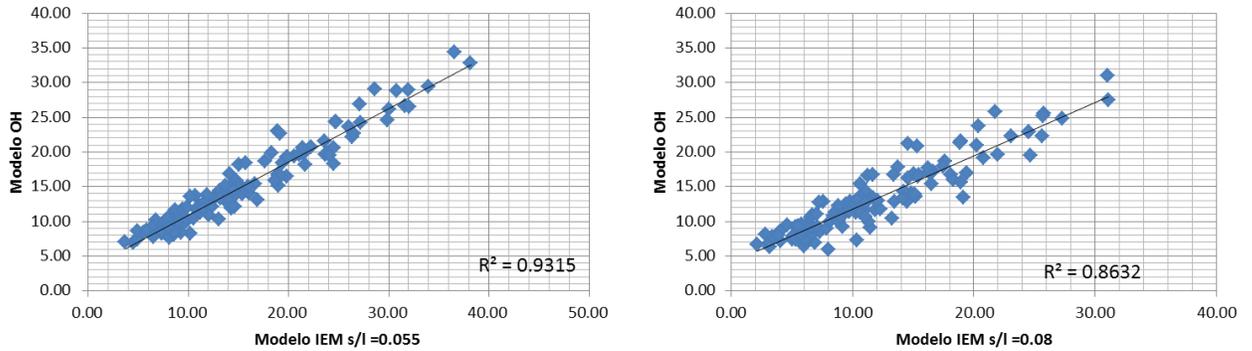


Figura 60: Regresión lineal del conjunto de datos de estimaciones de humedad de suelo (%), imágenes ALOS PALSAR: (a) Modelo OH vs Modelo IEM ajuste $s/l=0.055$, (b) Modelo OH vs Modelo IEM ajuste $s/l=0.08$.

7.6.2 Imágenes SARAT

Para el caso del sensor aerotransportado SARAT se trabajó con 19 imágenes de la zona de Bell Ville, Provincia de Córdoba y se siguió el mismo procedimiento que se realizó con las imágenes ALOS PALSAR. Se tomaron 5 áreas de interés de cada imagen, el tamaño promedio de las mismas es de 9379 píxeles. En la tabla 18 se muestran los resultados obtenidos de diferencia media absoluta entre los modelos para los dos casos de estudio. Se observa que para este sensor la menor diferencia de estimaciones, tanto de humedad como rugosidad superficial de suelo, se obtuvo para el caso de OH versus IEM con ajuste $s/l=0.08$.

Diferencia Media Absoluta entre Modelos		
	OH vs IEM ($s/l=0.055$)	OH vs IEM ($s/l=0.08$)
Mv (%)	4.45	1.80
s (cm)	2.06	1.71

Tabla 18: Estimaciones de Humedad de Suelo y Rugosidad superficial de Suelo, diferencia media absoluta entre los modelos, imágenes SARAT.

Las siguientes gráficas muestran estimaciones de humedad de suelo de las áreas de interés seleccionadas para los dos casos de estudio. A los datos se les realizó una regresión lineal simple y de los coeficientes de determinación se obtuvieron que ambos ajustes del modelo IEM para el sensor SARAT también resultan ser muy buenos, siendo el caso $s/l=0.08$ el mejor de los dos.

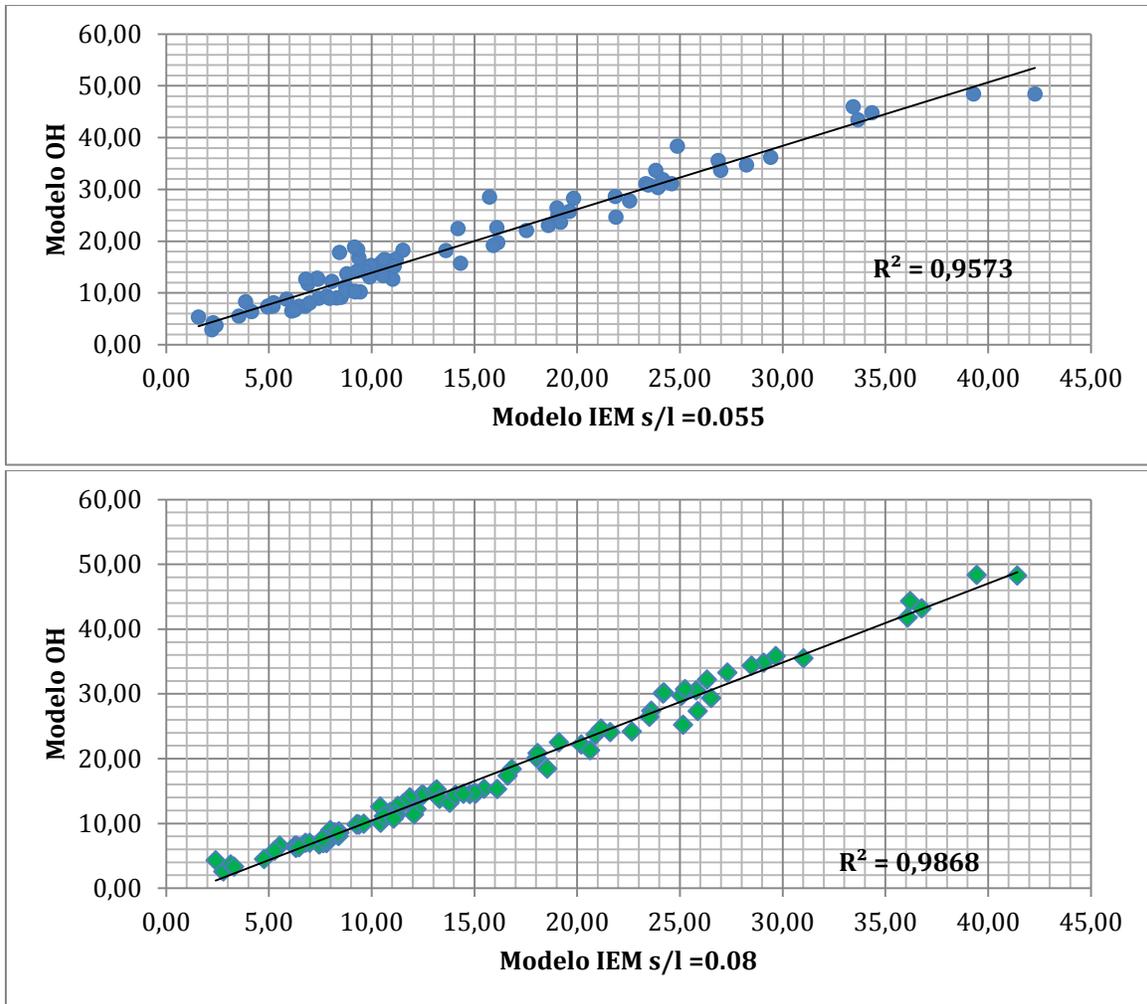


Figura 61: Estimación de humedad de suelo (%), imágenes SARAT: (a) Modelo OH vs Modelo IEM ajuste $s/l=0.055$, (b) Modelo OH vs Modelo IEM ajuste $s/l=0.08$.

7.6.3 Imágenes UAVSAR

Para el caso del sensor UAVSAR se contaron con 18 imágenes también de la zona de Bell Ville. Se volvieron a seleccionar 5 áreas de interés en cada imagen, para este caso el tamaño promedio fue de 26383 píxeles. La tabla 19 muestra los resultados obtenidos en diferencia media absoluta para las estimaciones de humedad de suelo y rugosidad superficial de suelo entre los modelos. Para este sensor los mejores resultados se obtienen al comparar las estimaciones del modelo de OH contra el modelo IEM con un ajuste de $s/l=0.055$.

Diferencia Media Absoluta entre Modelos		
	OH vs IEM (s/l=0.055)	OH vs IEM (s/l=0.08)
Mv (%)	1.25	2.46
s (cm)	0.12	0.14

Tabla 19: Estimaciones de Humedad de Suelo y Rugosidad superficial de Suelo, diferencia media absoluta entre los modelos, imágenes UAVSAR.

Se graficaron las estimaciones medias de humedad de suelo de los modelos y mediante regresión linear simple se observa que ambas modificaciones del modelo IEM resultan en buenos ajustes.

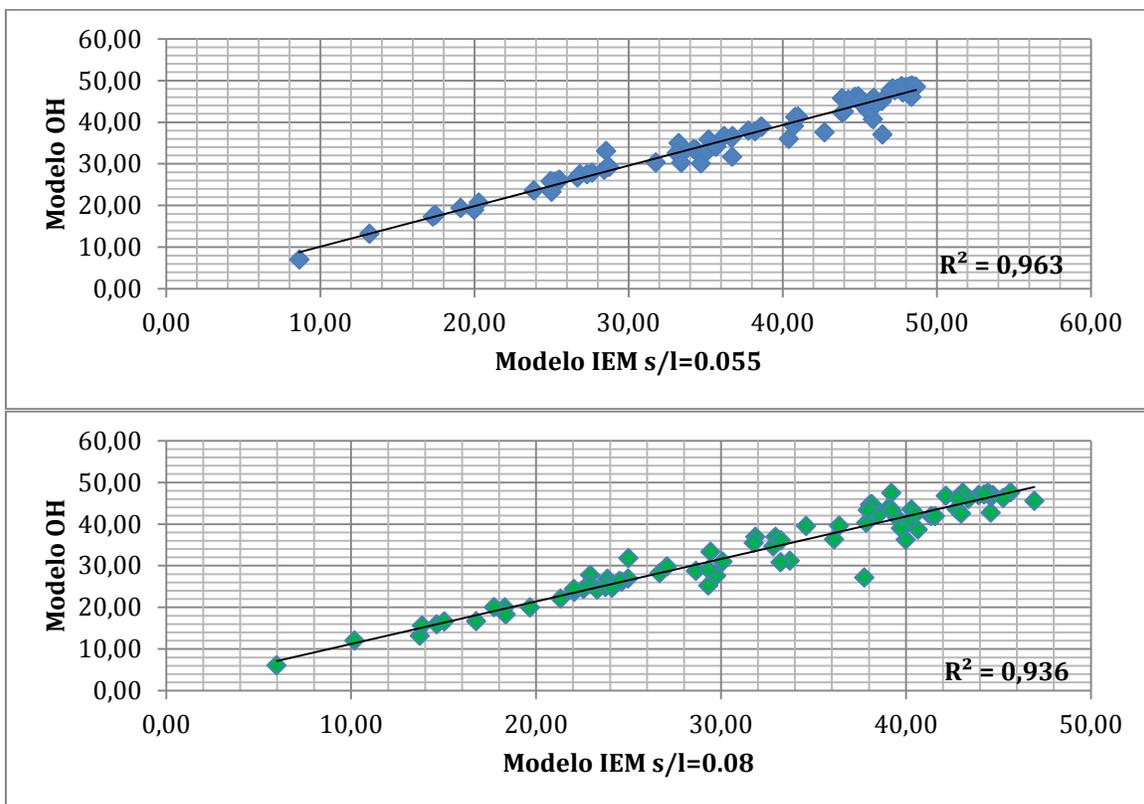


Figura 62: Estimación de humedad de suelo (%), imágenes UAVSAR: (a) Modelo OH vs Modelo IEM ajuste s/l=0.055, (b) Modelo OH vs Modelo IEM ajuste s/l=0.08.

8. Estudio de los Modelos en banda X: Análisis de sensibilidad y Ajuste del Modelo IEM

El objetivo de este estudio fue evaluar la posibilidad de aplicar los ajustes utilizados para el modelo IEM en banda L, en banda X, utilizando el procedimiento del capítulo seis en donde el modelo de Oh se toma como “verdad de campo”. El poder extender estos modelos a banda X permitiría una ventaja adicional al momento de calcular humedad de suelo, dado que se podría aprovechar las potencialidades del Sistema Ítalo Argentino de Satélites para beneficio de la sociedad, Gestión de Emergencias y desarrollo económico (SIASGE), el cual cuenta con cuatro satélites italianos COSMO-SkyMed en órbita operando en banda X y los dos satélites argentinos SAOCOM 1A y SAOCOM 1B.

En este capítulo se comprobará que la extensión a banda X conlleva algunas dificultades cuando se la quiere aplicar en todo el rango de rugosidad $k \cdot s < 3$ permitido por el modelo de IEM. No obstante, se pueden obtener resultados buenos en una parte significativa del rango de rugosidad según el ángulo de incidencia utilizado.

El procedimiento utilizado para el estudio de los modelos en banda X fue el siguiente:

1. Se realizó el análisis de sensibilidad del modelo de OH (sec. 8.1)
2. Se realizó también el análisis de sensibilidad del modelo IEM en banda X con una longitud de correlación fija. Para el modelo IEM se trabajó con la función de autocorrelación exponencial y luego con la correlación gaussiana para estudiar cómo se comportaba el modelo. Se encontró que el coeficiente de retrodispersión mostraba un comportamiento no físico⁵ en parte del rango de aplicabilidad de IEM; i.e. $k \cdot s < 3$ (en banda X esto corresponde con una rugosidad menor a 1.5 cm) (sec. 8.2).
3. Se probaron los ajustes del modelo IEM utilizados en banda L ($s/l=0.055$ y $s/l=0.08$) y se estudiaron modificaciones del parámetro s/l a modo de adecuarlo para trabajar en este rango de frecuencias. Se estudió la posibilidad de dividir el

⁵ Como es sabido que el valor del coeficiente de retrodispersión aumenta con aumentos en rugosidad y de humedad de suelo. Cuando el valor del mismo decrece con incrementos del porcentaje de humedad o del valor de rugosidad se considera que el coeficiente de retrodispersión muestra un comportamiento no físico.

rango de rugosidades y utilizar correlación exponencial en el modelo IEM para rugosidades menores a 1cm y correlación gaussiana para $s > 1\text{cm}$, para ello se analizó cómo se comporta el modelo IEM con correlación gaussiana en este espectro de rugosidades. Los mismos comportamientos no-físicos encontrados con longitud de correlación constante siguieron apareciendo (sec. 8.3).

4. Se estudió un modelo más complejo, el modelo de Baghdadi (basado en un ajuste con datos empíricos) para ver si se consigue un mejor comportamiento del coeficiente de retrodispersión en función de la rugosidad (sec.8.4). No obstante, también se obtienen rangos no físicos cuando se grafica la retrodispersión en función de la rugosidad.
5. Se comparó el modelo lineal propuesto en la sección 8.3 (usando la función de autocorrelación exponencial propuesta en esta tesis con $s/l=0.055$) y el modelo de Baghdadi (sec. 8.5).

8.1. Sensibilidad Modelo Oh en banda X

Para el estudio de sensibilidad del modelo de Oh en banda X ($\lambda = 3\text{ cm}$) primeramente se modificó el rango de valores de rugosidad para adecuarlo al rango de validez del modelo Oh que es $0.13 < k_s < 6.98$. Cabe señalar que este nuevo rango de rugosidad también tiene que estar comprendido dentro del rango de validez del modelo IEM ($k_s < 3$) que es con el cual se quiere lograr el acople de los modelos. Los rangos de humedad de suelo y el rango angular permanecen invariantes,

- Humedad del suelo (M_v): 5% - 40%
- Rugosidad (s): 0.5 cm. - 1,5 cm.
- Ángulo de incidencia: 20° - 50°
- Longitud correlación: 20 cm

La figura 63 muestra la relación entre el valor de retrodispersión y la rugosidad para distintos porcentajes de humedad superficial y la figura 64 la relación entre σ_{HH}° y la humedad superficial para distintos valores de rugosidad. Como en el caso de banda L, en banda X se observa la misma tendencia, es decir, que el valor del coeficiente de retrodispersión aumenta al incrementar el porcentaje de humedad superficial y al aumentar la rugosidad del suelo.

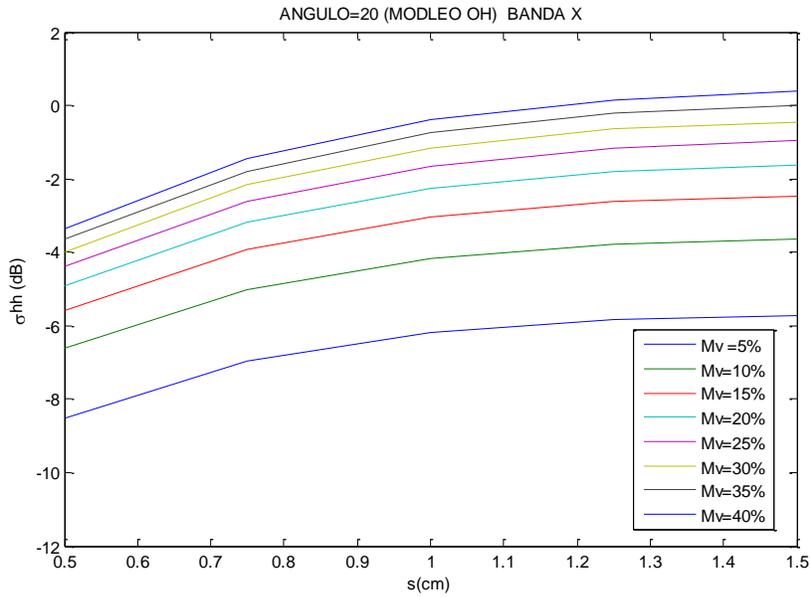


Figura 63: Simulación modelo de OH para banda X y ángulo de incidencia 20°, σ_{HH}° vs. rugosidad superficial.

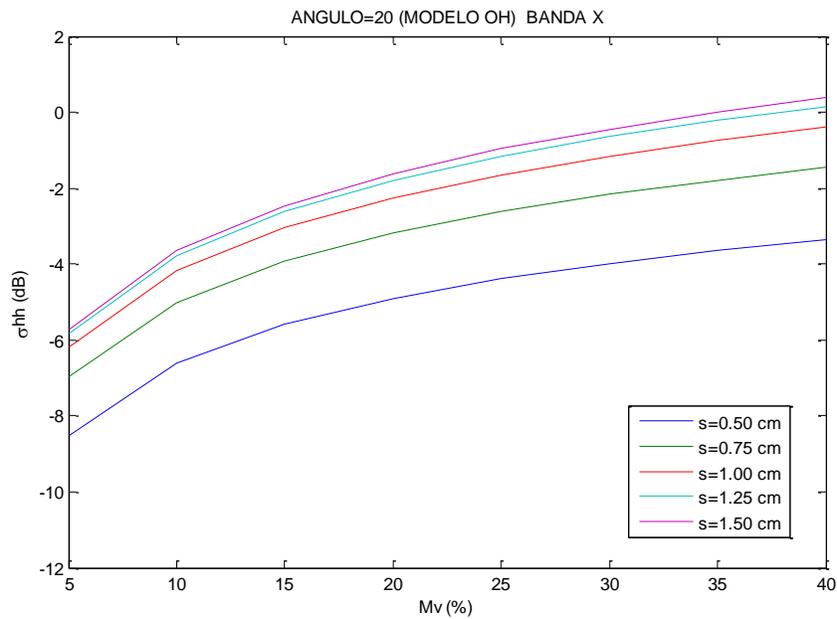


Figura 64: Simulación modelo de OH para banda X y ángulo de incidencia 20°, σ_{HH}° vs. humedad superficial.

Al igual que en el caso de banda L, se obtuvo como salida del modelo de OH para banda X gráficos 3D que vuelven a mostrar, para un ángulo constante, la relación que existe

entre los tres parámetros bajo estudio. A continuación se muestra el gráfico para la componente HH.

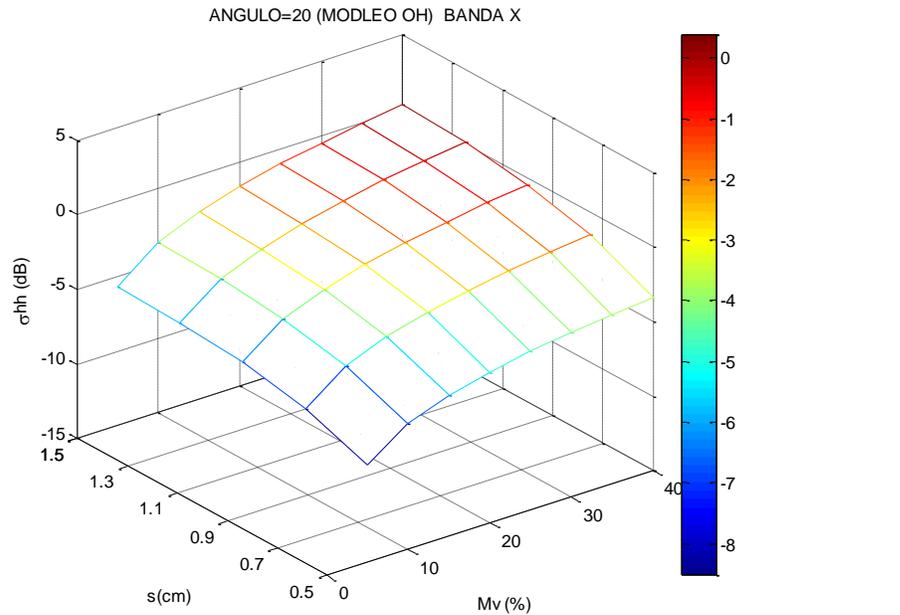


Figura 65: Simulación 3D del modelo de Oh banda X para ángulo de incidencia de 20° y polarización HH.

Según Oh et al. (2010) el modelo tiene un rango de validez más amplio que el modelo IEM, de modo que el coeficiente de retrodispersión puede ser computado para valores más grande de altura r_{sm} incluso en banda X. La máxima sensibilidad del coeficiente de retrodispersión con la rugosidad superficial en banda X es de 6.7 dB mientras que para banda L la máxima sensibilidad obtenida es de 12 dB (Fig. 66). En el caso de análisis de sensibilidad de σ° con la humedad superficial los autores obtuvieron valores similares para bandas L y X.

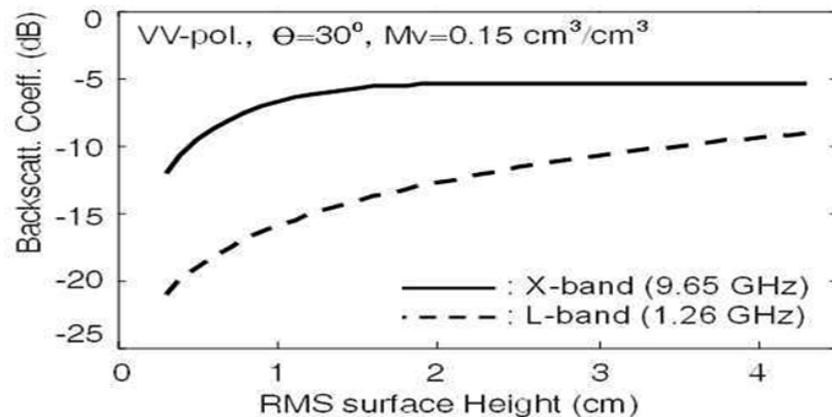


Figura 66: Sensibilidad del coeficiente de retrodispersión con la rugosidad para suelo desnudo (Oh et al., 2010)

Resultados similares a los de este trabajo se obtuvieron para las simulaciones realizadas con los parámetros de entrada descritos más arriba, en la tabla 20 se encuentra resumidos los rangos dinámicos en decibeles.

Polarización	Modelo OH Rango Dinámico (dB)	
	HH	VV
Mv: 5%-40%	5.5	6.3
s: 0.5 cm - 5 cm	5.0	3.9
θ : 20°-50° y s=0.5 cm	4.7	6.3
θ : 20°-50° y s=3.5 cm	6.0	6.3

Tabla 20: Rangos Dinámicos Modelo de Oh en Banda X.

8.2. Sensibilidad Modelo IEM en banda X

Para el análisis de sensibilidad del modelo IEM en banda X se utilizaron los mismos rangos de humedad, rugosidad y ángulos descritos en la sección 7.1. La figura 67 muestra la relación entre σ° de la componente HH y la rugosidad del suelo, para un ángulo de incidencia de 20° y longitud de correlación fija $l=20$ aumenta con el incremento del contenido de humedad de suelo. Para niveles de rugosidad mayores a 1 cm, el valor del coeficiente de retrodispersión comienza a descender hasta alcanzar valores no físicos, para valores de rugosidad cercanos al límite del rango de validez del modelo ($k_s < 3$). Físicamente, la retrodispersión debería aumentar con la rugosidad.

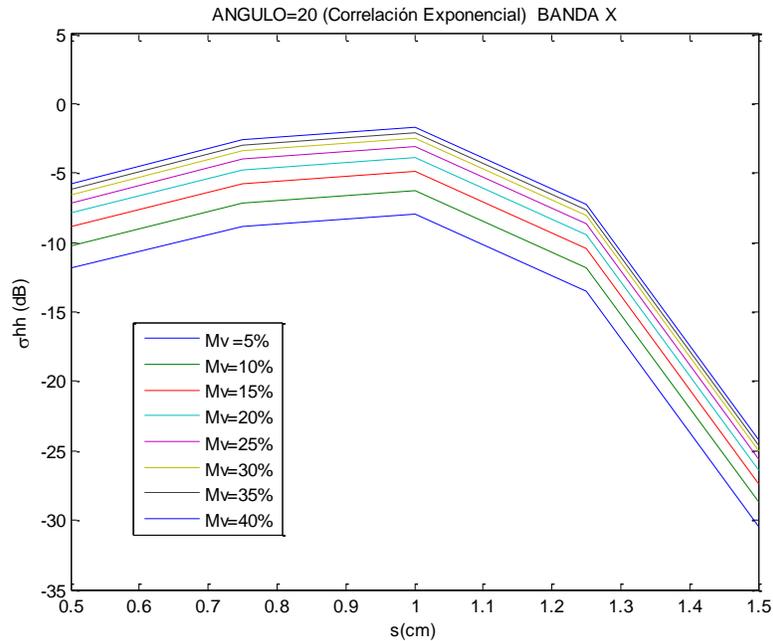


Figura 67: Simulación modelo IEM para banda X, $l= 20$ cm y ángulo de incidencia 20° , σ_{VV}° vs. rugosidad superficial.

La figura 68 muestra la relación entre el coeficiente de retrodispersión para la componente HH y la humedad superficial del suelo, para niveles de rugosidad entre 0.5 cm y 1.5 cm. Al igual que en el modelo de Oh, el valor del coeficiente de retrodispersión aumenta con el incremento del contenido de humedad de suelo. Para niveles de rugosidad mayores a 1 cm, el valor del coeficiente de retrodispersión comienza a descender hasta alcanzar valores no físicos, para valores de rugosidad cercanos al límite del rango de validez del modelo ($k \cdot s < 3$).

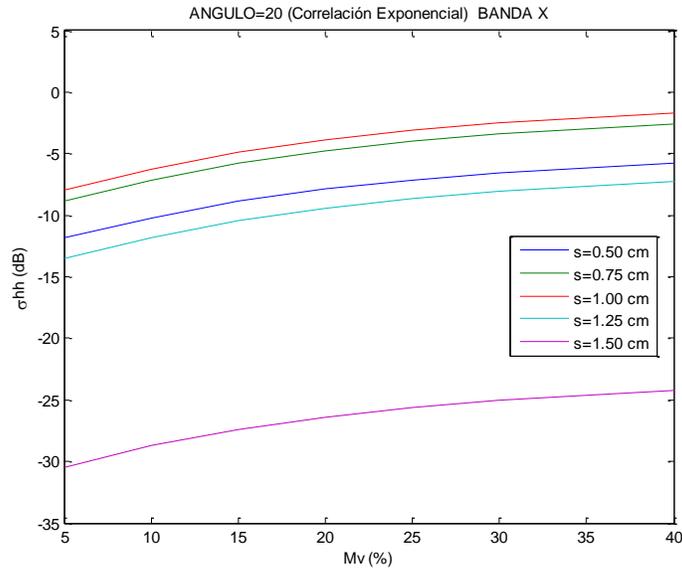


Figura 68: Simulación modelo IEM para banda X y ángulo de incidencia 20° , σ_{HH}^o vs. humedad superficial.

La figura 69 muestra la simulación en 3D del modelo IEM en banda X, donde se visualiza primero el comportamiento ascendente del coeficiente de retrodispersión (con aumento de nivel de rugosidad y porcentaje de humedad superficial del suelo) y luego su descenso hacia valores no físicos para los niveles de rugosidad mayores a 1 cm.

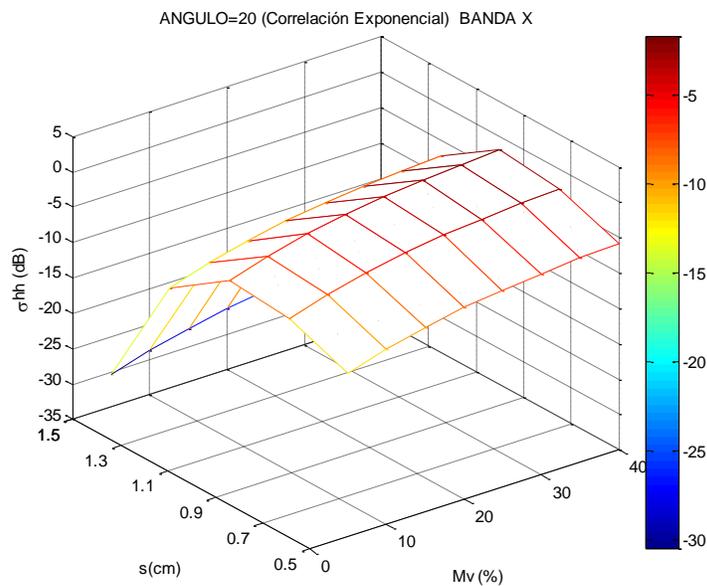


Figura 69: Simulación 3D del modelo IEM banda X para ángulo de incidencia de 20° y polarización HH.

Se cambió la función de autocorrelación utilizada en IEM para evaluar si en banda X usando una correlación gaussiana el modelo IEM se aproxima al modelo de OH, los rangos de rugosidad y humedad del suelo se mantuvieron invariantes. Los resultados obtenidos se muestran a continuación

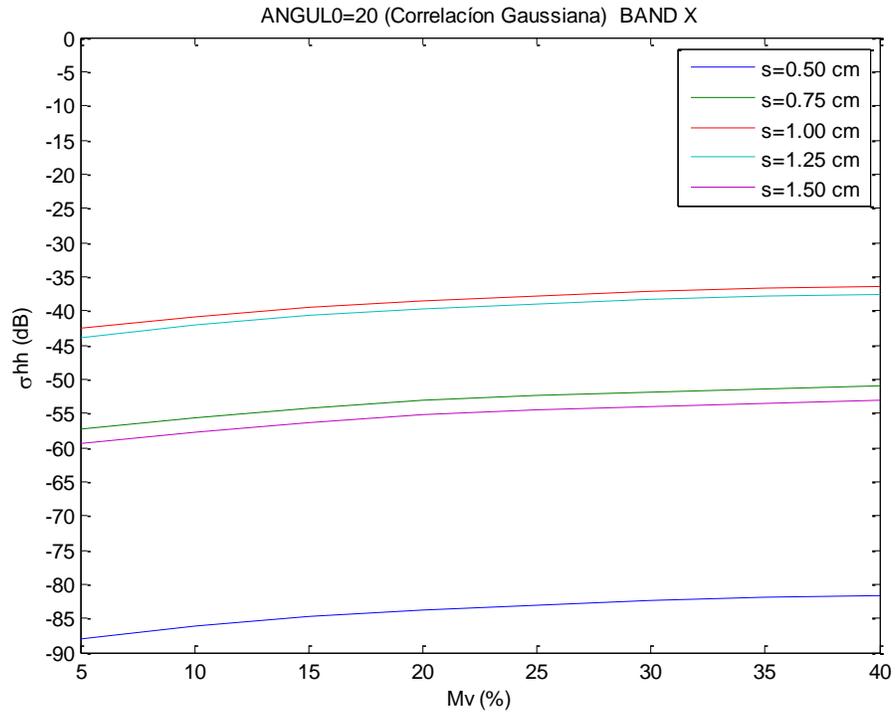


Figura 70: Simulación modelo IEM para banda X y ángulo de incidencia 20°, σ_{HH}° vs. humedad superficial.

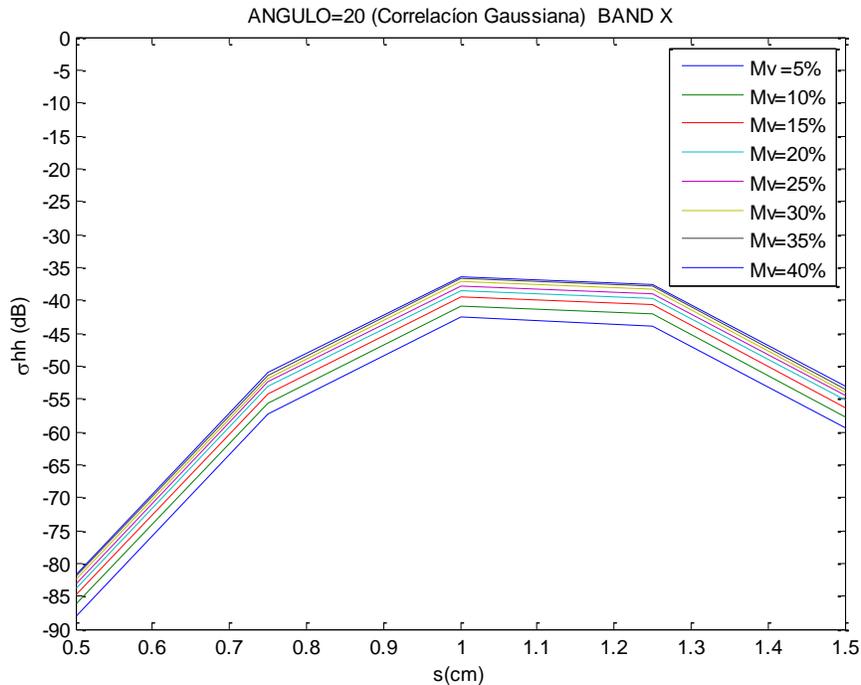


Figura 71: Simulación modelo IEM para banda X y ángulo de incidencia 20°, σ_{HH}° vs. rugosidad superficial.

La figura 70 muestra que si bien el coeficiente de retrodispersión aumenta con el aumento de humedad de suelo, los valores obtenidos en las simulaciones no son válidos. La figura 71 muestra que para curvas fijas de humedad de suelo el coeficiente de retrodispersión aumenta con aumentos de rugosidad pero para $s > 1$ cm σ° comienza a decrecer. Se concluye que la correlación gaussiana del modelo IEM no es aplicable en banda X, debido a que para todo el rango angular las estimaciones del coeficiente de retrodispersión dieron valores no físicos.

Por lo tanto, debido al comportamiento que muestra el modelo IEM en banda X no se calcularon los rangos dinámicos.

8.3. Ajuste del modelo IEM para Banda X

En primera instancia se utilizaron los mismos parámetros de ajuste s/l usados en banda L para evaluar que ocurría con el modelo al modificar el parámetro de frecuencia. La AFC usada en este análisis es la exponencial, ya que en la sección anterior se mostró que la gaussiana para banda X se obtiene valores no válidos. Por lo que se descarta la opción de dividir el rango de rugosidades en dos y trabajar con AFC exponencial para $s < 1$ cm y ACF gaussiana para $s > 1$ cm.

Al incorporar el ajuste $s/l = 0,055$ se observó que el coeficiente de retrodispersión en ambas polarizaciones aumenta a medida que incrementa la rugosidad pero a partir de cierto valor de altura rms (dentro del rango de estudio) comienza a descender abruptamente. El valor de rugosidad donde se produce el cambio no es un valor fijo, sino que se va corriendo al incrementar el ángulo de incidencia (Fig. 72- 75).

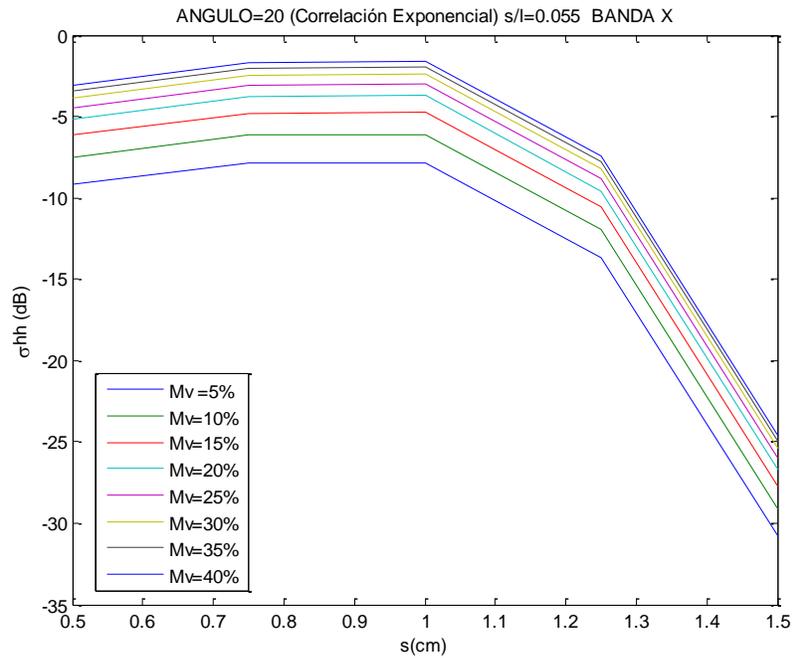


Figura 72: Simulación modelo IEM $s/l=0.055$: banda X, ángulo de incidencia 20° , σ_{HH}° vs. rugosidad superficial.

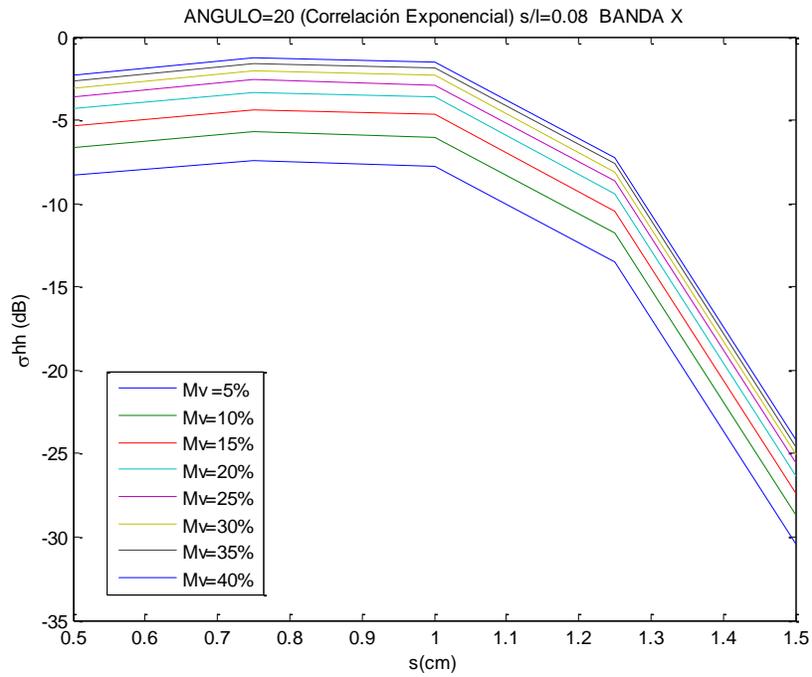


Figura 73: Simulación modelo IEM s/l=0.08: banda X, ángulo de incidencia 20°, σ_{HH}° vs. rugosidad superficial.

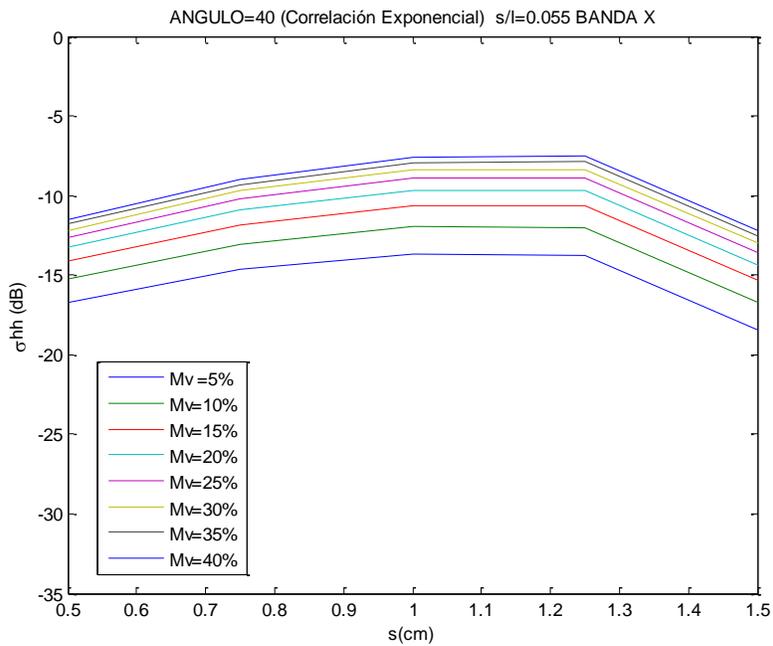


Figura 74: Simulación modelo IEM s/l=0.055: banda X, ángulo de incidencia 40°, σ_{HH}° vs. rugosidad superficial.

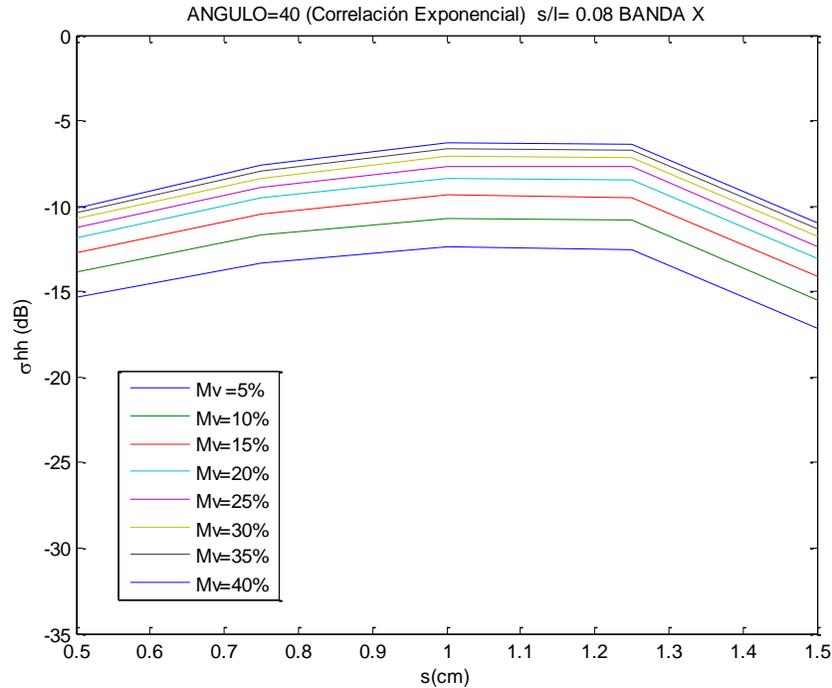


Figura 75: Simulación modelo IEM s/l=0.08: banda X, ángulo de incidencia 40°, σ_{HH}^o vs. rugosidad superficial.

Se propuso modificar el valor que toma s/l de modo de conseguir un buen ajuste del modelo en banda X. Para tal fin se probaron distintos valores de pendiente de rugosidad, entre 0,25 y 0,375, donde se registró que valor iba tomando el coeficiente de retrodispersión a medida que se variaba el valor de rugosidad superficial y de humedad del suelo. Para todos los casos analizados se repite la situación descrita anteriormente. A modo de ejemplo, la figura 76 ilustra este comportamiento para un valor de $s/l=0.325$, componente HH, ángulo de incidencia de 30°.

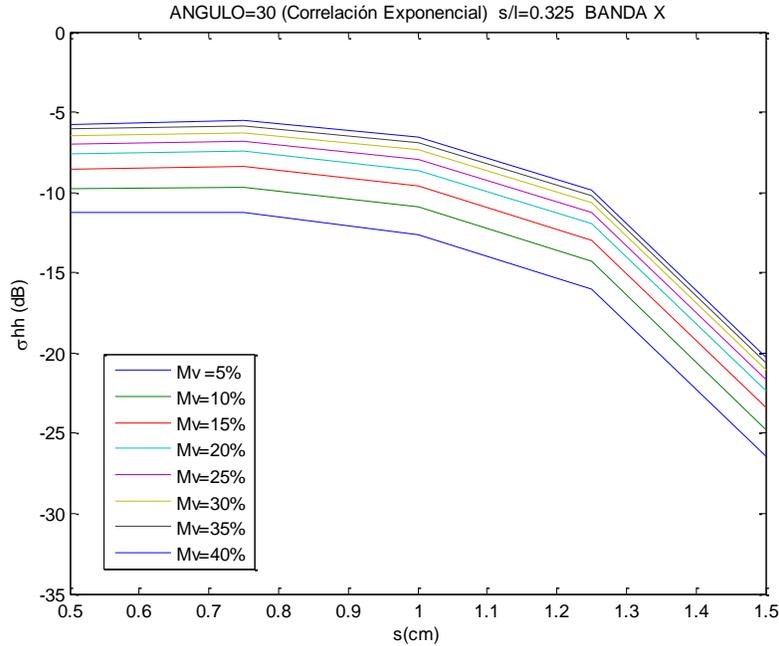


Figura 76: Simulación modelo de IEM con $s/l=0.325$: banda X, ángulo de incidencia 30° , σ_{HH}° vs. rugosidad superficial

8.4. Modelo de Baghdadi

Baghdadi et al. (2011) también propusieron una calibración semi-empírica del modelo IEM para banda X con el objetivo de asegurar un mejor acuerdo entre las simulaciones y los datos SAR. Sus resultados mostraron que si bien el parámetro de ajuste resultó ser robusto y estable, es fuertemente dependiente de la rugosidad como así también del ángulo de incidencia y de la polarización. En este trabajo, Baghdadi et al. (2011), proponen para el modelo IEM, con función de correlación gaussiana, la siguiente relación para los parámetros s y l entre 25° y 50° de θ :

$$l_{hh}(s, HH, \theta) = 18.102e^{-0.0033\theta} s^{0.7644} e^{0.0035\theta} \quad (37)$$

$$l_{vv}(s, VV, \theta) = 18.075e^{-0.0379\theta} s^{1.2594} e^{-0.0145\theta} \quad (38)$$

A continuación se muestran a modo de ejemplo los siguientes gráficos de salida que se obtuvieron al incluir la calibración semi-empírica de Baghdadi en el modelo IEM

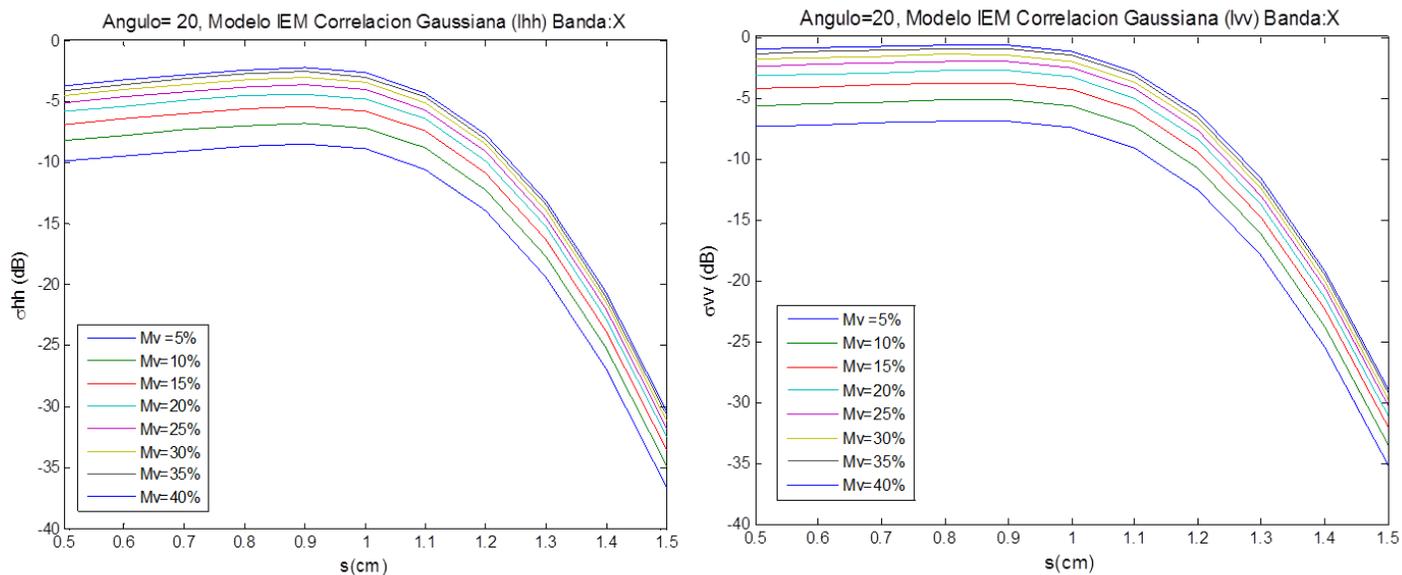


Figura 77: Simulación modelo IEM en banda X con calibración semi-empírica de Baghdadi para ángulo de incidencia de 20°, a) σ_{HH}^o vs. rugosidad superficial b) σ_{VV}^o vs. rugosidad superficial

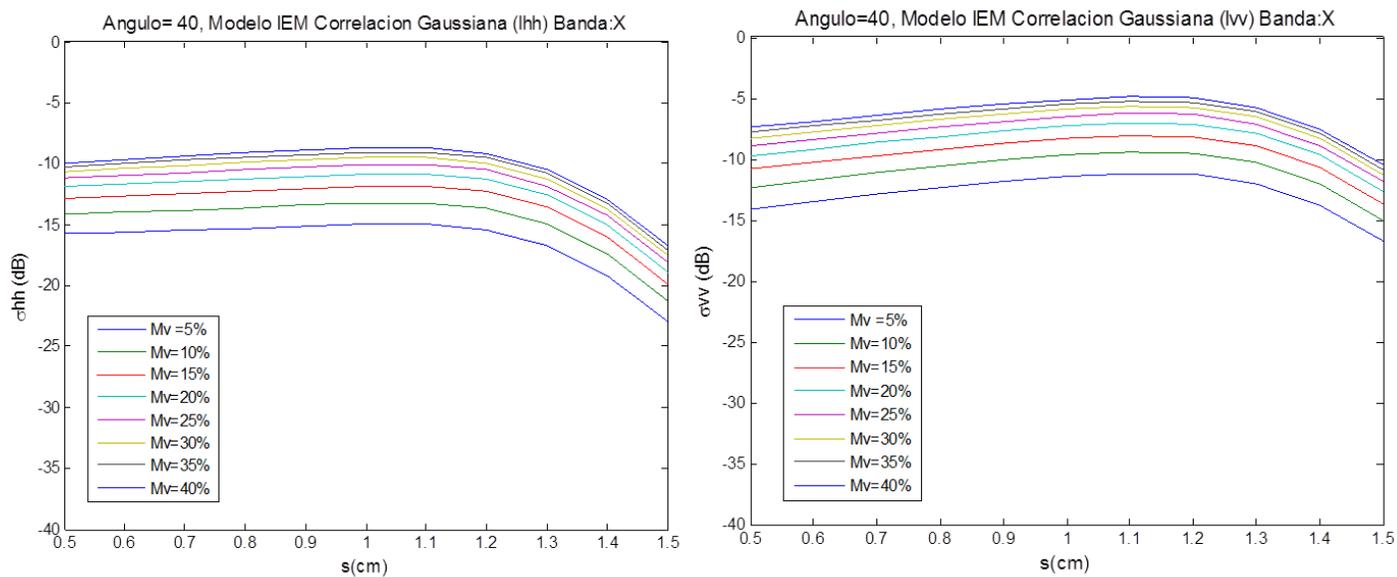


Figura 78: Simulación modelo IEM en banda X con calibración semi-empírica de Baghdadi para ángulo de incidencia de 20°, a) σ_{HH}^o vs. rugosidad superficial b) σ_{VV}^o vs. rugosidad superficial

Con esta calibración se puede ver que, el modelo IEM comienza a tomar valores razonables de retrodispersión con la función de autocorrelación gaussiana. En los gráficos 77 y 78 se puede ver que para valores chicos de rugosidad, el coeficiente de retrodispersión en ambas polarizaciones, aumenta a medida que se incrementa la rugosidad. El problema, nuevamente, es que a partir de un cierto valor de altura rms comienza a descender abruptamente el valor del coeficiente de retrodispersión. Al igual que los casos estudiados anteriormente, el valor de rugosidad donde se produce el cambio no es un valor fijo, sino que se va aumentando al incrementar el ángulo de incidencia.

8.5. Relación entre IEM y OH comparando modelo lineal y de Baghdadi

Al comparar las curvas obtenidas del modelo de OH y el modelo IEM usando la función de autocorrelación exponencial con $s/l=0.055$ y la propuesta en el trabajo de Baghdadi et al. (2011), se observa que en el rango de valores donde tiene sentido aplicar el modelo (es decir antes de que el valor del coeficiente de retrodispersión comience a descender), la parametrización de IEM usando autocorrelación exponencial ajusta mejor al modelo de OH, tal como los muestran los siguientes gráficos:

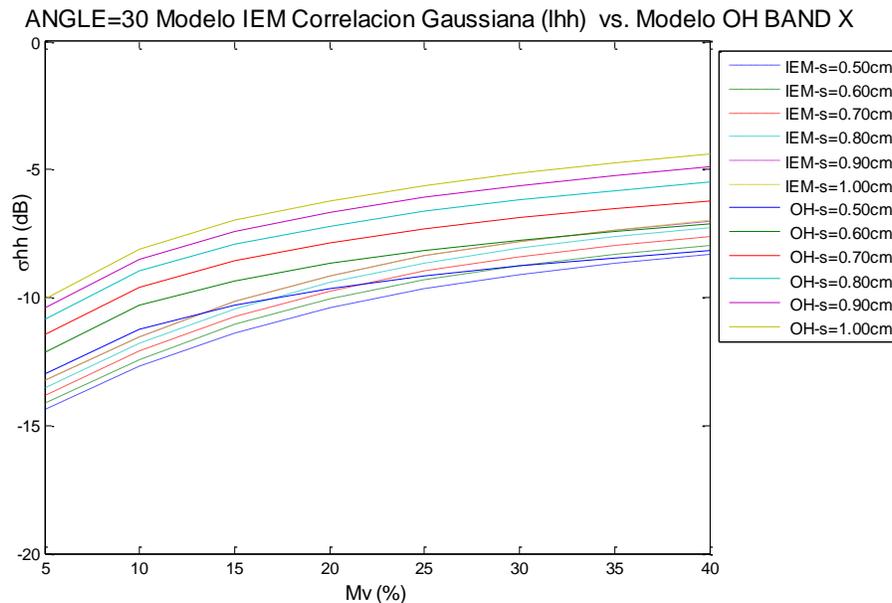


Figura 79: Coeficiente de retrodispersión (σ_{HH}°) vs humedad del suelo, comparación de simulaciones entre modelo de OH y modelo IEM con correlación Gaussiana y ajuste propuesto por Baghdadi et al. (2011).

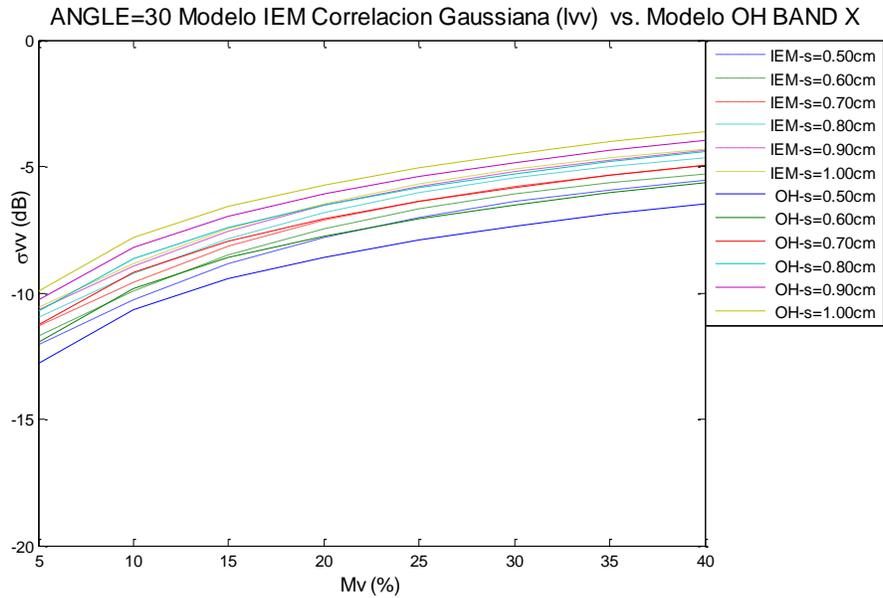


Figura 80: Coeficiente de retrodispersión (σ_{VV}°) vs humedad del suelo, comparación de simulaciones entre modelo de OH y modelo IEM con correlación Gaussiana y ajuste propuesto por Baghdadi por Baghdadi et al. (2011).

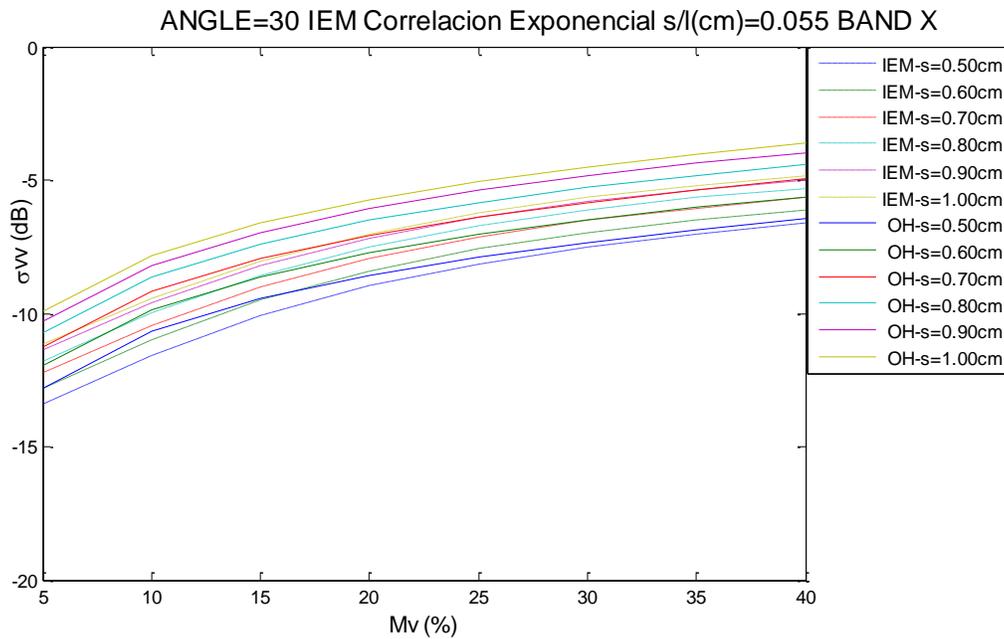


Figura 81: Coeficiente de retrodispersión (σ_{VV}°) vs humedad del suelo, comparación entre simulaciones modelo de OH y modelo IEM con correlación exponencial y $s/l=0.055$

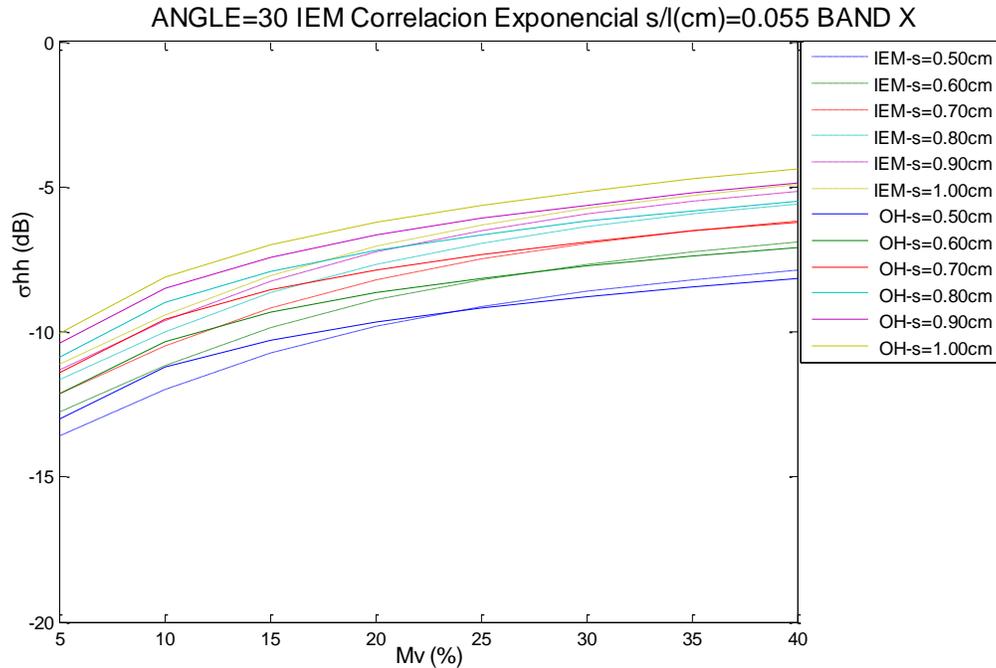


Figura 82: Coeficiente de retrodispersión (σ_{HH}°) vs humedad del suelo, comparación simulaciones modelo de OH, modelo IEM con correlación exponencial y $s/l=0.055$

Además, se calcularon las diferencias absolutas en decibeles del coeficiente de retrodispersión entre los modelos para corroborar lo que se observa en las gráficas. Para ello se utilizó el mismo procedimiento descrito en la sección 6.1, es decir: se calcularon las diferencias de estimación en todo el rango de humedades, para un ángulo fijo y una rugosidad fija y luego se calculó el promedio de estas diferencias. Se trabajó con tres niveles de rugosidad y con ángulos entre 20° y 50° . La tabla 21 muestra la comparación de resultados entre el modelo de Oh y el modelo IEM con el ajuste propuesto por Baghdadi et al. (2011).

		Promedio de Diferencia Absoluta entre Modelos (dB)	
Rugosidad	θ	HH_IEM_Baghdadi vs HH_OH	VV_IEM_Baghdadi vs VV_OH
s= 0.5 cm	20°	0.94	2.86
	30°	0.73	0.77
	40°	0.54	1.08
	50°	3.04	5.26
s= 0.7 cm	20°	0.36	1.63
	30°	1.86	0.11
	40°	1.09	0.65
	50°	1.37	4.41
s=1 cm	20°	1.22	0.11
	30°	2.92	0.74
	40°	2.23	0.68
	50°	0.24	3.75

Tabla 21: Promedio de Diferencia Absoluta entre el modelo de Oh y el modelo IEM con el ajuste propuesto por Baghdadi et al. (2011).

Si bien el promedio de diferencias absolutas entre estimaciones de los modelos son mínimas, en la componente VV se evidencian las mayores diferencias sobre todo a ángulos grandes. En cambio, al comparar Oh versus IEM con correlación exponencial y $s/l=0.055$ (tabla 22), vemos que se logra un mejor ajuste de los modelos para ambas componentes.

		Promedio de Diferencia Absoluta entre Modelos (dB)	
Rugosidad	θ	HH_IEM_EXP_s/l=0.055 vs HH_OH	VV_IEM_EXP_s/l=0.055 vs VV_OH
s= 0.5 cm	20°	1.62	0.90
	30°	0.35	0.40
	40°	0.98	1.01
	50°	1.15	0.85
s= 0.7 cm	20°	1.11	0.57
	30°	0.35	0.88
	40°	0.89	1.53
	50°	0.69	1.44
s=1 cm	20°	0.24	0.51
	30°	0.83	1.29
	40°	1.04	1.68
	50°	0.59	1.58

Tabla 22: Promedio de Diferencia Absoluta entre el modelo de Oh y el modelo IEM con correlación exponencial $s/l=0.055$

Por ende, vemos que la relación lineal en banda L, usando la función de autocorrelación exponencial propuesta en esta tesis con $s/l=0.055$, sigue demostrando un ajuste óptimo en banda X en el rango de valores físicos. Las secciones 8.2, 8.3 y 8.4 nos obligan a rever el rango de factibilidad del modelo de IEM en banda X, al menos en este contexto. No obstante, cuando estamos en un rango de comportamientos físicos, es posible ajustar IEM y OH de la misma manera para ambas longitud de ondas.

9. Conclusiones

En la presente tesis se ha hecho un estudio de los modelos electromagnéticos Oh e IEM para la obtención de humedad superficial a suelo desnudo para las bandas L y X, y se analizó el uso de un parámetro de ajuste dentro del modelo IEM para reducir las diferencias en estimación de humedad de suelo y rugosidad que tenía con el modelo de Oh.

Del análisis teórico de los modelos se evaluó la sensibilidad teórica de los mismos para banda L. Ambos modelos mostraron ser sensibles a cambios de humedad y rugosidad, ya que al correr simulaciones se observó como el valor del coeficiente de retrodispersión aumenta su valor a medida que el porcentaje de contenido volumétrico de humedad de suelo se incrementa. A su vez, al ir aumentando el ángulo de incidencia el efecto de la rugosidad va siendo cada vez mayor, lo que genera una disminución del valor de σ° hasta en 10 dB. Para una longitud de correlación fija el modelo IEM (sin incorporar aún el parámetro de ajuste) presentó mayor sensibilidad que el modelo Oh y las diferencias absolutas en decibelios del coeficiente de retrodispersión entre los modelos varían entre 1 dB y 7.7 dB.

Para el acople de los modelos se introdujo como parámetro de ajuste la pendiente de rugosidad s/l que no sólo ha sido demostrada en la literatura que permite reducir las diferencias en estimaciones de los modelos sino que además permite salvar la dificultad que existe a la hora de medir correctamente la longitud de correlación. Los dos casos elegidos, $s/l = 0.055$ y $s/l = 0.08$ dieron resultados satisfactorios ya que se redujo la diferencia entre los rangos dinámicos, obtenidos de las simulaciones:

- ✓ Ajuste $s/l = 0.055$, el modelo IEM sigue presentando mayor sensibilidad frente a los parámetros de humedad de suelo, rugosidad y variación angular, salvo el caso del parámetro rugosidad con polarización VV donde el modelo de Oh resulta más sensible. Las diferencias entre el modelo Oh y el IEM ajustado van de 0.8 dB hasta 4.5 dB.
- ✓ Ajuste $s/l = 0.08$, en este caso el modelo Oh resulta más sensible que el modelo IEM para el parámetro rugosidad y variación angular (a rugosidad baja) para polarización VV. Las diferencias de los rangos dinámicos de los parámetros de estudio entre los modelos van desde 0.4 dB a 3.3 dB.

Para validar los ajustes del modelo IEM en banda L se trabajó con imágenes SAR de las misiones ALOS-PALSAR, SARAT y UAVSAR. Todas las imágenes utilizadas pertenecen a distintas zonas dentro de la Región Pampeana, que es el área de interés de la misión SAOCOM. Se concluye luego de analizar las diferencias medias absolutas de las estimaciones de humedad de suelo y rugosidad superficial de suelo de los modelos, que para cada uno de los sensores con los que se trabajó ambos ajustes del modelo IEM resultaron óptimos.

- ✓ ALOS-PALSAR: se trabajó con la estimación media de humedad de suelo y rugosidad a nivel provincia para calcular la diferencia media absoluta entre los modelos. El mejor acople entre modelos en la estimación de humedad de suelo se obtuvo para las imágenes de la provincia de Buenos Aires para $s/l=0.055$ y para Entre Ríos con $s/l=0.08$. Analizando el conjunto de todas las imágenes, para este sensor el ajuste que mejores resultados dio fue $s/l=0.055$.
- ✓ SARAT: las imágenes utilizadas correspondían a la misma zona (alrededores de Bell Ville). Para las estimaciones de humedad de suelo y rugosidad superficial de suelo el caso de estudio Modelo de Oh versus Modelo IEM con ajuste $s/l=0.08$ fue el que menor diferencia media absoluta mostró, por lo que se considera como el ajuste óptimo de los dos para este sensor.
- ✓ UAVSAR: para este sensor los mejores resultados se obtienen al comparar las estimaciones del modelo de OH contra el modelo IEM con un ajuste de $s/l=0.055$. Todas las imágenes UAVSAR con las que se trabajó también corresponden a la zona de Bell Ville.

Por último, se evaluó la posibilidad de aplicar los ajustes utilizados en banda L, para el modelo IEM en banda X. Para ello se estudió el comportamiento en banda X de los modelos Oh e IEM para poder compararlos. Las simulaciones del modelo de Oh se obtuvieron sin problemas, mostrando una máxima sensibilidad de 5 dB con el parámetro rugosidad, algo que concuerda con el análisis de sensibilidad realizado por los autores del modelo. El análisis de sensibilidad del modelo IEM para banda X se realizó primero usando correlación exponencial y luego correlación gaussiana, siempre para una longitud de correlación fija. Para IEM con correlación exponencial se demostró que este modelo es válido sólo para un rango acotado de rugosidades, ya que para rugosidades mayores a un centímetro el valor del coeficiente de retrodispersión desciende abruptamente. En el caso de la correlación gaussiana, se concluyó que no es aplicable en banda X, ya que los valores de coeficiente de retrodispersión obtenidos de las simulaciones no son válidos. Esto descarta la hipótesis planteada por distintos autores que sugieren para IEM dividir el rango de rugosidades para trabajar con ACF exponencial para $s < 1\text{cm}$ y ACF gaussiana para $s > 1\text{cm}$.

El ajuste del modelo IEM con los parámetros usados en banda L ($s/l=0.055$ y $s/l=0.08$) volvió a mostrar problemas en las simulaciones, ya que si bien el valor del coeficiente de

retrodispersión aumenta con incrementos de humedad de suelo y rugosidad superficial del suelo, para un cierto valor del parámetro de rugosidad σ° decrece bruscamente hasta valores no físico. El valor de rugosidad donde se produce el cambio no es un valor fijo, sino que se va incrementando al incrementar el ángulo de incidencia. Se probaron valores de s/l entre 0,25 y 0,375, para ver si se lograba un acople de los modelos en banda X, pero para todos los casos analizados se volvió a observar el mismo comportamiento.

También se aplicó la calibración semi-empírica del modelo IEM para banda X propuesta por Baghdadi et al. (2011), el cual utiliza la función de autocorrelación gaussiana. Las simulaciones del modelo IEM con AFC gaussiana, muestra un comportamiento del coeficiente de retrodispersión esperable (su valor se incrementa con aumentos de rugosidad y humedad de suelo), pero nuevamente a partir de un cierto nivel de rugosidad comienza a descender abruptamente.

Por último, se compararon por un lado las curvas obtenidas del modelo de Oh contra las del modelo IEM con el ajuste propuesto para banda L ($s/l=0.055$), AFC exponencial y un rango de rugosidades entre 0.5 cm y 1 cm (dependiendo del ángulo de incidencia, el límite superior puede llegar a 1.3 cm). Por otro lado se compararon los resultados obtenidos de la calibración propuesta en el trabajo de Baghdadi et al. (2011) versus el modelo Oh, usando el mismo rango de rugosidades que el caso anterior. Se concluyó que para este rango de rugosidades, la parametrización de IEM propuesta en esta tesis, ajusta mejor al modelo de OH que la propuesta por Baghdadi et al. (2011).

En resumen, el parámetro de ajuste $s/l=0.055$ para el modelo IEM utilizado y validado con imágenes SAR en banda L también funciona en banda X, con autocorrelación exponencial y dentro de un rango de rugosidades entre 0.5 cm y 1 cm. Por lo que es posible ajustar IEM y Oh de la misma manera para ambas longitudes de onda. Esto implica que también sería posible obtener mapas de humedad de suelo a partir de datos en banda X, aprovechando así las potencialidades del SIASGE que cuenta en la actualidad con 4 satélites italianos COSMO-SkyMed en órbita y operando.

En el futuro, una vez que los 2 satélites argentinos SAOCOM se integren de forma operacional al SIASGE, se podrá obtener información actualizada cada 12 horas, lo que permitirá un monitoreo casi en tiempo real tanto de emergencias naturales (incendios, inundaciones, los derrames de hidrocarburo en el mar, etc.) como de variables hidrológicas importantes para el desarrollo de aplicaciones agrícolas, hidrológicas, para la salud pública, etc.

Estimar la humedad de suelo a una gran escala desde sensores instalados en satélites, con una cobertura completa y periódica de la superficie terrestre, posibilita planificar y gerenciar la producción agrícola debido a que muchas decisiones son tomadas en función de esta variable, la cual influye directamente en el potencial de los lotes de

cultivos. Esto resulta en un impacto beneficioso para la región pampeana debido a que la misma presenta como principales actividades la agricultura y ganadería.

El desarrollo de mapas temáticos de humedad del suelo podría ser aprovechado por las empresas de agro-negocios (brokers, commodity, etc.), las empresas de servicios del sector agrícola, productores rurales, acopiadores, etc. En el ámbito público, también podrían beneficiarse distintas instituciones volcadas al manejo de los recursos naturales (suelos y aguas), como así también instituciones científico-técnicas.

Queda abierta como línea de investigación la posibilidad de realizar la validación para banda X del modelo IEM con autocorrelación exponencial y $s/l=0.055$, mediante el uso de imágenes COSMO-SkyMed. Como así también la profundización en una aplicación que permita combinar los datos en banda L y en banda X para obtener estimaciones de humedad de suelo.

Bibliografía

Altese E, Bolognani O, Mancini M, Troch P, (1996). "Retrieving soil moisture over bare soil from ERS-1 synthetic aperture radar data: sensitivity analysis based on a theoretical surface scattering model and field data". *Water Resources Research* 32(3): 653–661.

Alvarez-Mozos, J., González-Audícana M, Casalí J y Larranaga, A, (2008). "Effective versus measured correlation length for radar-based surface soil moisture retrieval". *International Journal of Remote Sensing* 29: 5397–5408.

Álvarez-Mozos J, Casalí J y González-Audícana M, (2005). "Teledetección radar como herramienta para la estimación de la humedad superficial del suelo en cuencas agrícolas". *Revista de Teledetección* 23: 27-42.

Barret B, Dwyer E, y Whelan P, (2009). "Soil moisture retrieval from active spaceborne microwave observations: An evaluation of current techniques". *Remote Sensing*, 1:210–242.

Baghdadi N, Saba E, Aubert M, Zibri M y Baup F, (2011). "Evaluation of radar backscattering models IEM, Oh and Dubois for SAR data in X-band over bare soils". *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 8(6): 1160-1164.

Baghdadi N, Holah N y Zribi M, (2006). "Soil moisture estimation using multi-incidence and multipolarization ASAR data". *International Journal of Remote Sensing* 27: 1907-1920.

Baghdadi N, Gherboudj I, Zirbi M, Sahebi M, King C, y Bonn F, (2004). "Semi-empirical calibration of the IEM backscattering model using radar images and moisture and roughness field measurements". *International Journal of Remote Sensing* 25(18): 3593–3623.

Baghdadi N, King C, Chanzy A, y Wigneron J, (2002). "An empirical calibration of the integral equation model based on SAR data, soil moisture and surface roughness measurement over bare soils". *International Journal of Remote Sensing* 23(20):4325–4340.

Beaulieu N, Leclerc G y Moisan Y, (1995). "Détermination de la rugosité de surface par des méthodes accessibles". *Canadian Journal of Remote Sensing*, Ottawa, v.21, n.2, p. 198-203

CCRS. (2001). "Programa GlobeSAR: Material educativo para teledetección mediante radares." *Canada Centre for Remote Sensing CCRS*, Natural Resources Canada, from <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/tekrd/internet/glbsar2/indexe.html>.

Chen K, Yen S y Huang W, (1995). "A simple model for retrieving bare soil moisture from radarscattering coefficients". *Remote Sensing of Environment* 54:121-126

Chuvienco E, (2010). *Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio*. Ariel.

Curlander J y McDonough R, (1991). *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*. Wiley, John & Sons.

Dadamia D, (2010). "Permittivity of soil analysis". SAOCOM Project. Código: GS-STA-DSN-AN-0000900-A. CONAE

Dadamia D, (2009). "ALOS PALSAR Data Analysis October-December 2009, in the pampean región". CONAE

Dadamia D. y Thibeault M., (2009). "Effect of calibration error on surface soil moisture map". Código: GS-STA-DSN-AN-A. CONAE

Davidson M, Mattia F, Satalino G, Verhoest N, Letoan T, Orgeaud M, Louis J y Attema E, (2003). "Joint statistical properties of RMS height and correlation length derived from multisite 1-m roughness measurements". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41(7): 1651-1658.

Dubois P, Van Zyl J, Lingman T, (1995). "Measuring Soil Moisture with Imaging Radars". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33: 896 – 904.

Engman E, (1991). "Application of microwave remote sensing of soil moisture for water resources and agricultural". *Remote Sensing of Environment* 35:213–226.

Farr T, (1993). Guide to Magellan Image Interpretation, Chapter 5: Radar Interactions with Geological Surfaces. NASA, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology Pasadena. <http://history.nasa.gov/JPL-93-24/ch5.htm>

Fung A y Kuo N, (2005). "Backscattering from Multi-scale and Exponentially Correlated Surfaces". *Progress in Electromagnetics Research Symposium 2005*, Hangzhou, China, August 22-26.

Fung A, (1994). *Microwave scattering and emission models and their applications*. Arctech House Norwood, USA.

Fung A, Li Z y Chen K, (1992). "Backscattering from a randomly rough dielectric surface". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 30: 356-369.

Gupta V y Jangid R, (2011). "Microwave response of rough surfaces with auto-correlation functions, RMS heights and correlation lengths using active remote sensing". *Indian Journal of Radio & Space Physics* 40: 137-146.

Hall A, Rebella C, Ghera C and Culot J, (1992). "Fieldcrop systems of the pampas. In: *Field crop ecosystems*." C. J. Pearson (ed.). p. 413-450. Elsevier, Amsterdam.

Henderson F y Lewis A, (1998). *Radar Fundamentals: The Geoscience Perspective*. John Wiley and Sons Inc.

Hendrickx J, Van Dam R, Borchers B, Curtis J, Lensen H y Harmon R, (2003). "Worldwide distribution of soil dielectric and thermal properties". *Detection and remediation technologies for mines and minelike targets VIII, Proceedings of the SPIE* (Harmon, R.S., Holloway, J. H., and Broach, J.T., eds.), 5089: 1158-1168.

Holah N, Baghdadi N, Zribi M, Bruand A y King C, (2005). "Potential of ASAR/ENVISAT for the characterization of soil surface parameters over bare agricultural fields". *Remote Sensing of Environment* 96: 78-86.

Holmes T, (2003). "Measuring surface soil parameters using passive microwave remote sensing The ELBARA field campaign 2003". Tesis, Faculteit der Aard- en Levenswetenschappen, Vrije Universiteit. Amsterdam.

Jackson T, Mcnairn H, Weltz M, Brisco B, y Brown R, (1997). "First Order Surface Roughness Correction of Active Microwave Observations for Estimating Soil Moisture". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35(4): 1065-1069.

Jones S y Friedman S, (2000). "Particle shape effects on the effective permittivity of anisotropic or isotropic media consisting of aligned or randomly oriented ellipsoidal particles". *Water Resources Research* 36: 2821-2833.

Karszenbaum H. (2007). Obtención de parámetros biofísicos utilizando datos satelitales de radar de apertura sintética SAR: combinación de modelos de interacción y observaciones. *Seminario dictado en Gerencia Investigación y Aplicaciones "Laboratorio Tandar", Comisión Nacional de Energía Atómica.*
http://www.tandar.cnea.gov.ar/eventos/seminariosGlyA/2007/20071026-Parametros_Biofisicos-Karszenbaum.pdf

Kim Y and Van Zyl J, (2004). "Vegetation effects on soil moisture estimation". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.

Lanfri S, (2011). "Desarrollo de una metodología para la detección de cuerpos de agua mediante el análisis de imágenes SAR COSMO SkyMed y de DEMs". *Tesis Maestría en Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias*. Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich, CONAE. http://aulavirtual.ig.conae.gov.ar/moodle/pluginfile.php/512/mod_page/content/85/Lanfri_1.pdf

Lievens H, Verhouest N, De Keyser E., Vernieuwe H., Matgen P, Álvarez-Mozos J y De Baets B, (2011). "Effective roughness modelling as a tool for soil moisture retrieval from C-and L-band SAR". *Hydrology and Earth System Sciences* 15:151-162

Lopinto Ettore (2012). Aplicación de imágenes de radar de apertura sintética. Apuntes de clases. Maestría en Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias

Miller T, (2002). "Radar detection of buried landmines in field Soils". Tesis de Master en Ciencias, New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, New Mexico.

Miyamoto T, Annaka T y Chikushi J, (2003). "Soil aggregate structure effects on dielectric permittivity of an andisol measured by time domain reflectometry". *Vadose Zone Journal* 2: 90–97.

Moran M, Watts J, Peters-Lidard C y McElroy S, (2004). "Estimating soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models". *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30(5): 805–826.

Njokul E y Entekhabi D, (1994). *Passive microwaves remote sensing of soil moisture*. Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology Pasadena.

Oh Y, Kwon S-G y Hwang J-H, (2010). "Soil moisture measurement of bare and vegetated surface by X-band radars". *Journal of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science* 10(4): 212-217.

Oh Y, (2004). "Quantitative Retrieval of Soil Moisture Content and Surface Roughness from Multipolarized Radar Observations of Bare Soil Surfaces". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42(3): 596-604.

Oh Y, Kay Y, (1998) "Conditions for precise measurements of soil surface roughness" *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36: 691–695.

Oh Y, Sarabandi K, Ulaby F, (1992). "An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 30(2): 370–381.

Pampaloni P, Santi E, Paloscia S, Pettinato S, y Poggi P, (2004). *Radar Remote Sensing of Soil Moisture - ENVISNOW Project - SMC algorithms*. Technical report, IFAC – CNR.

Panozzo Zénere M, (2013). Focalización de imágenes SAR utilizando el algoritmo Omega-K. Simulación y Validación. Tesis Maestría en Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias. Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich, CONAE.
http://aulavirtual.ig.conae.gov.ar/moodle/pluginfile.php/512/mod_page/content/78/M_Panozzo-Tesis.pdf

Peplinski N, Ulaby F y Dobson M, (1995). “Dielectric Properties of Soils in the 0.3-1.3-GHz Range”. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33(3).

Rao K, Raju S y Wang J, Center N, Greenbelt M, (1993).” Estimation of soil moisture and surface roughness parameters from backscattering coefficient”. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 31:1094-1099.

Robinson D, Jones S, Blonquist J y Friedman S, (2005). “A Physically Derived Water Content/Permittivity Calibration Model for Coarse-Textured, Layered Soils”. *Soil Science Society of America Journal* 69: 1372–1378

Salgado H, (2006). “Distribución Espacial de la Rugosidad en Parcelas Agrícolas en Provincia de Buenos Aires, Argentina”. *Engenharia Agricola* 26(2): 600-609

SARMAP, UNESCO BILKO group, European Space Agency (2008). *Synthetic Aperture Radar and SARscape*.

Schaap M, Robinson D, Friedman S y Lazar A, (2003). “Measurement and modeling of the TDR signal propagation through layered dielectric media”. *Soil Science Society of America Journal* 67:1113–1121.

Schmugge T, (1983). “Remote Sensing of Soil Moisture: Recent Advances”. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 21: 336-344.

Su Z, Troch P y De Troch F, (1997). “Remote sensing of soil moisture using EMAC/ESAR data”, *International Journal of Remote Sensing* 18: 2105–2124.

Topp G, Davis J y Annan A, (1980). “Electromagnetic Determination of soil water content: Measurements in Coaxial Transmission Lines”. *Water Resources Research* 16(3): 574 – 582.

Ulaby F, Moore R, Fung A, (1986). *Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Volume Scattering and Emission Theory, Advanced Systems and Applications*. Dedham, MA, USA.

Ulaby F, Moore R y Fung A, (1982). *Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Volume I Radar Remote Sensing: Fundamentals and Radiometry*. Artech House, Inc. Norwood, USA.

Van Zyl J y Kim Y, (2010). *Synthetic Aperture Radar Polarimetry*. JPL Space Science and Technology. ISBN 978-1-118-11511-4

Vega P, (2001) "Radar de Subsuelo. Evaluación para aplicaciones en Arqueología y en Patrimonio Histórico-Artístico". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.

A. Fórmula de Debye

La permitividad eléctrica del agua libre la podríamos escribir utilizando la fórmula de Debye:

$$\epsilon_w = \epsilon_{w\infty} + \frac{\epsilon_{w0} - \epsilon_{w\infty}}{1 + j2\pi f\tau_w} \quad (A.1)$$

Donde:

ϵ_{w0} =Permitividad relativa estática (a corriente continua) del agua libre.

$\epsilon_{w\infty}$ = permitividad relativa en el límite de altas frecuencias (alrededor de 4.9).

f = frecuencia (Hz).

τ = tiempo de relajación.

De la racionalización de la ecuación (A.1) obtenemos:

La parte real de la permitividad:

$$\epsilon'_w = \epsilon_{w\infty} + \frac{\epsilon_{w0} - \epsilon_{w\infty}}{1 + (2\pi f\tau_w)^2} \quad (A.2)$$

y la parte imaginaria:

$$\epsilon''_w = -\frac{2\pi f\tau_w(\epsilon_{w0} - \epsilon_{w\infty})}{1 + (2\pi f\tau_w)^2} \quad (A.3)$$

B. Misiones SAR

B.1 Misión Advance Land Observing Satellite, ALOS-1

Desarrollado por la Agencia Espacial Japonesa, el satélite ALOS-1 fue lanzado en 2006 y estuvo operativo hasta mayo de 2011 cuando dejó de funcionar debido a una falla. La misión DAICHI-2 (ALOS-2) fue puesta en órbita en mayo de este año y se encuentra en etapa de calibración.

La misión ALOS-1 tiene como objetivos principales⁶:

- Cartografiar para proveer de mapas a Japón y los países de la región Asia-Pacífico
- Realizar observaciones regionales para fomentar el equilibrio entre el planeta y el desarrollo.
- Monitorear desastres naturales de manera global.
- Monitorear recursos naturales.
- Desarrollar tecnología para futuros satélites de observación de la Tierra.

ALOS-1 permite obtener simultáneamente imágenes ópticas y radar gracias a tres sensores que lleva a bordo: una cámara pancromática Panchromatic Remote Sensing Instruments for Stereoreo Mapping (PRISM) con una resolución de 2.5 m., una cámara multi-espectral Advance Visible and Near Infrared Radiometer type 2 (AVNIR-2) que permite observar la cobertura del suelo con una resolución de 10m. y un sensor SAR en banda L Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR).

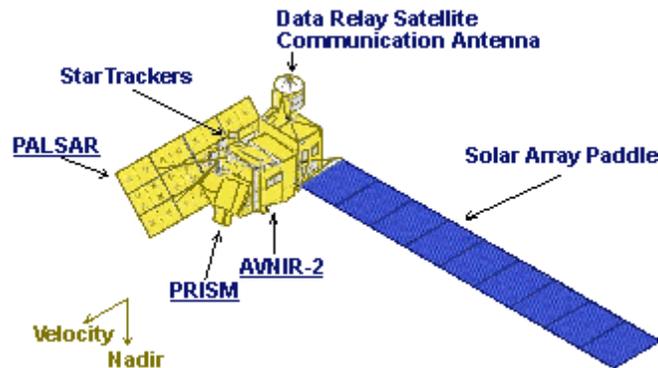


Figura B.1: Satélite "Advanced Land Observing Satellite, ALOS" (JAXA, 2011).

El sensor PALSAR es un Radar de Apertura Sintética full polarimétrico capaz de adquirir datos a una resolución espacial de 12.5 metros. Tiene una frecuencia central de 1.27 GHz (banda L) y trabaja en un rango angular entre 8 y 60 grados.

⁶ http://www.jaxa.jp/index_e.html

La Figura B.2 muestra un concepto de observación de PALSAR y la tabla B.1 describe los modos de adquisición del sensor.

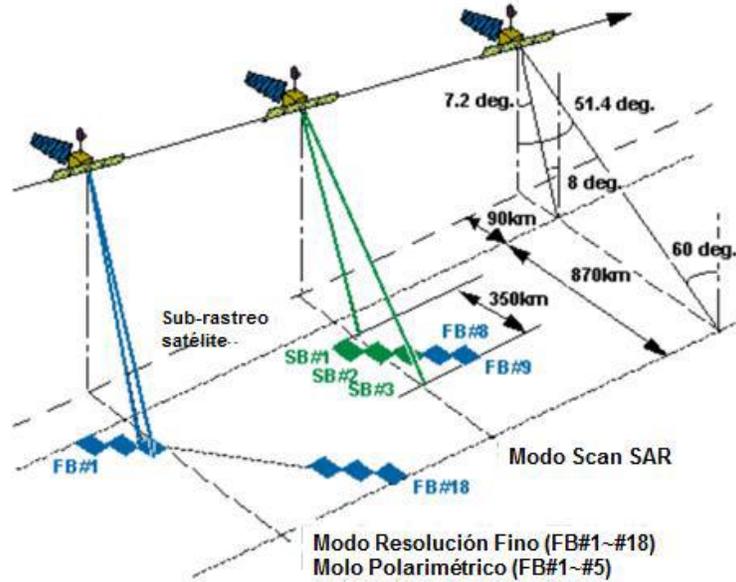


Figura B.2: Características de observación de PALSAR⁷.

Características	Modo de observación			
	Modo fino	Modo ScanSAR	Modo Polarimétrico	
Frecuencia	1270 MHz, banda L (23.6 cm)			
Ancho de banda Chirp	28MHz	14MHz	14MHz, 28MHz	14MHz
Polarización	HH o VV	HH+HV o VV+VH	HH o VV	HH+HV + VV+VH
Angulo incidencia	8-60°	8-60°	18-43°	8-30°
Resolución en Rango	7-44 m	14-88 m	100 m (multilook)	24-89 m
Ancho de observación (Swath)	40-70 Km	40-70 Km	250-350 Km	20-65 Km
Longitud de Bit	5 bits	5 bits	5 bits	3 o 5 bits
Velocidad de datos	240 Mbps	240 Mbps	120 Mbps, 240 Mbps	240 Mbps
NE (Noise Equivalent) sigma zero *2	< -23 dB (Swath 70 km) < -25 dB (Swath 60 km)		< -25 dB	< -29 dB
Precisión radiométrica	Precisión relativa dentro de imagen: 1 dB Precisión relativa dentro de órbita: 1.5 dB			
PRF	1500 – 2500 Hz			

Tabla B.1: Características principales del instrumento PALSAR⁷.

⁷ http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/kyoto/ref/ALOS_BioGeo-04.pdf

B.2 Misión SARAT

Como punto de partida y como preparación al uso de la información de imágenes satelitales en banda L para la misión SAOCOM, la CONAE ha incluido en sus programas al proyecto SARAT (SAR Aerotransportado), que consiste en el desarrollo de instrumentos aerotransportados SAR polarimétricos que operan en banda L. En este sentido el proyecto SARAT tiene por objetivo otorgar datos para pruebas de uso, desarrollo de aplicaciones, evaluación de métodos de procesamiento y generación de procesos de planificación de captaciones⁸.

El instrumento SAR (Fig.B.3) se encuentra instalado en un avión Beechcraft Super King Air B-200 biturbohélice de la Armada Argentina (Fig. B.4), que posee 7 horas de autonomía de vuelo con un rango nominal de alturas de vuelo entre 3900 y 4500 m, y una velocidad nominal de 100 m/seg.



Figura B.3: Sensor Aerotransportado SARAT



Figura B.4: Avión Beechcraft Super King Air B-200, que transporta el sensor

⁸ <http://www.conae.gov.ar/index.php/espanol/misiones-satelitales/saocom/sarat>

El proyecto SARAT tiene por objetivo fundamental proveer de imágenes SAR full polarimétricas para desarrollar y validar distintas aplicaciones, antes del lanzamiento del primer satélite de la misión SAOCOM, el SAOCOM 1A. Para la concreción del proyecto se diseñó un sensor de radar con las características similares a las que tendrá el Satélite SAOCOM:

- ✓ Misma banda de frecuencia.
- ✓ Similar ancho de banda.
- ✓ Potencia disponible equivalente.
- ✓ Similar rango dinámico de la señal (misma capacidad para reconocer los límites entre señal-ruido).
- ✓ Tamaño de la antena a escala, manteniendo el diseño de los módulos irradiantes.

En la siguiente tabla se resumen las características técnicas de la misión SARAT.

Frecuencia central	1.3 GHz (Banda L)
Ancho de banda del Chirp	38.9 MHz
Duración del pulso	10 μ s
PRF	250 Hz
Ancho de barrido	9 km (nominal a 4200 m de altura)
Resolución en Acimut	1.2 m (nominal)
Resolución en Slant Range	5.5 m
Resolución espacial	6 m (nominal)
Polarización	Quad-Pol (HH, HV, VH y VV)
Ángulo de incidencia	20° - 70° (nominal a 4200 m)
Rango dinámico	45 dB
PSLR	-25 dB
Ruido Equivalente σ^0	-36.9 dB

Tabla B.2: Características Técnicas sensor SARAT

B.3 Misión UAVSAR

Desarrollado por Jet Propulsion Laboratory de la NASA y NASA/DFRC (Dryden Flight Research Center), UAVSAR (Uninhabited Aerial Vehicle Synthetic Aperture Radar) es un SAR full polarimétrico que opera en banda L y entró operativo en el año 2009 (Fig.B.5). Se encuentra montado en un avión Gulfstream III de la NASA (Fig. B.6), que vuela a una altitud de 12496.8 metros y a una velocidad de avance nominal de 221 m/seg., la duración típica de vuelo es de 6 horas.



Figura B.5: Sensor Aerotransportado UAVSAR⁹



Figura B.6: Avión Gulfstream III que transporta el sensor⁹.

El objetivo principal de la misión UAVSAR es cartografiar con precisión las deformaciones de la corteza terrestre asociadas a las amenazas naturales, como los volcanes y los terremotos. El sistema fue diseñado también para soportar una amplia gama de investigaciones científicas, incluyendo estudios de la criósfera, la vegetación y usos del suelo, la investigación arqueológica, la humedad del suelo y la geología, entre otros¹⁰.

En la siguiente tabla se encuentran resumidas las principales características del sensor,

⁹ <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/airborne-sensors/uavsar>

¹⁰ <https://www.asf.alaska.edu/news-notes/7-1/jpl-uavsar/>

Center frequency	1.2575 GHz, (L-band), corresponding to a wavelength of 23.79 cm
Chirp bandwidth	80 MHz
Intrinsic resolution	1.8 m slant range, 0.8 m azimuth
Polarization	Full quad-polarization
Swath width at nominal altitude of 13800 m	16 km
Look angle range	25° - 65°
Raw ADC bit quantization	12 bit (baseline)
Waveform	Nominal chirp/arbitrary waveform
Antenna size	0.5 m (range) x 1.6 m (azimuth)
Azimuth steering capability	> ±20°
Instrument power	3.1 kW
Polarization isolation	<- 20 dB
NESZ (Noise Equivalent Sigma Zero)	< - 50 dB
Operating altitude range	2000 - 18000 m
Ground speed range	100 - 250 m/s

Tabla B.3: Características Técnicas sensor UAVSAR⁹.