



**Generación e interpretación de modelos
geológicos digitales y geomorfológicos de
la región de Sputnik Plateau en Plutón,
basados en datos de imágenes satelitales,
espectros y parámetros físicos.**

Javier Eduardo Suarez Valencia

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá, Colombia

2017

Generación e interpretación de modelos geológicos digitales y geomorfológicos de la región de Sputnik Plateau en Plutón basados en datos de imágenes satelitales, espectros y parámetros físicos.

Javier Eduardo Suarez Valencia

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Geología

Director:

Ph.D. Luis Hernán Ochoa Gutiérrez

Firma: _____

Codirector:

MSc. Camilo Delgado Correal

Asesor:

(c) PhD Fabián Saavedra Daza

Línea de Investigación:

Ciencias planetarias

Grupo de Investigación:

GCPA- Grupo de ciencias planetarias y astrobiología

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá, Colombia
2017

Humanity has the stars in its future, and that future is too important to be lost under the burden of juvenile folly and ignorant superstition.

Isaac Asimov

Agradecimientos

Mis más sinceros agradecimientos a las personas que tanto facilitaron el desarrollo de este trabajo: Fabián Saavedra Daza, Camilo Delgado Correal y Luis Hernán Ochoa, sin su pronta ayuda no hubiera sido posible realizar este trabajo.

Agradezco también a todo el grupo de ciencias planetarias y astrobiología, por su constante ayuda para aclarar conceptos o simplemente apoyar el desarrollo de este trabajo.

Agradezco también a mis padres por todo el apoyo que me han brindado, incluso hasta en esta etapa de la maestría.

A Yuri Tatiana Campo Rodríguez, por todas las pequeñas y grandes maneras en las que me ayudo en este largo proceso.

Por último, a la facultad de ciencias por su programa de becas, que me permitió mantener el sustento económico durante toda mi maestría.

Contenido

Agradecimientos	4
Resumen	8
Abstract	10
1. Introducción	15
1.1 Problema de Investigación	15
1.2 Preguntas del proyecto	16
1.3 Motivación	16
1.4 Objetivo General	17
1.5 Objetivos específicos	17
1.6 Justificación	17
1.7 Área de estudio	18
1.8 Metodología	20
2. Marco teórico	22
2.1 El espectro electromagnético	22
2.1.1 Espectros de reflexión y emisión	23
2.2 Reflectancia	26
2.3 Plutón	28
2.3.1 Historia	28
2.3.2 Observación y estudio	30
2.3.3 Geología de Plutón	32
2.4 Sensores remotos	37
2.4.1 Historia de los sensores remotos	37
2.4.2 Sondas espaciales	38
2.4.3 New Horizons	40

2.4.4 Instrumentación	41
2.5 Hielo y fisicoquímica	43
2.5.1 Tipos de hielo en el sistema solar.....	44
2.5.2 Tipos de hielo en Plutón	46
3. Manejo y corrección de datos	51
3.1 Descarga y visualización.....	52
3.2 Transformación de los datos	54
3.3 Procesamiento datos de LORRI.....	56
3.3.1 Mosaicos	56
3.3.2 Modulación de color	57
3.3.2 Sistema de coordenadas	62
3.4 Corrección del Modelo digital de elevación	63
3.5 Georreferenciación	65
3.6 Procesamiento datos de LEISA	67
4. Análisis Geomorfológicos	71
4.1 Geomorfología general	71
4.1.1 Terrenos.....	72
4.2 Sputnik Planitia	83
4.2.1 Margen Oeste.....	84
4.2.2 Zona sur	97
4.2.3 Margen Este	99
4.2.4 Planicie central	103
5. Análisis Morfométricos	113
5.1 Modelo digital de elevación	113
5.2 Modelo de sombras	117
5.3 Pendiente.....	117
5.4 Aspecto.....	121

6. Calculo de temperatura superficial	124
7. Análisis Multiespectral	126
7.1 Firmas espectrales.....	126
7.2 Composiciones en los terrenos	129
7.2.1 Hielos de CH ₄	130
7.2.3 Hielo de H ₂ O.....	132
7.2.2 Hielos de N ₂ y CO	134
7.3 Composiciones en Sputnik Planitia	137
8. Discusión	140
8.1 Importancia de la reología.....	140
8.2 Edades Relativas	141
8.3 Convección y sus señales.....	144
8.4 Modelo convectivo propuesto.....	149
8.5 Regresión de Sputnik Planitia	150
8.6 Evolución geológica	153
9. Conclusiones	157
10. Bibliografía.....	160

Resumen

En este trabajo se realizó un análisis detallado de los datos satelitales obtenidos por el sobrevuelo de la sonda Nuevos Horizontes (New Horizons, en inglés) sobre el planeta enano Plutón, en busca de ahondar en el conocimiento de los procesos geológicos que han formado su superficie gélida y establecer la historia geológica de sus principales terrenos. Para tal fin se seleccionó como zona de estudio Sputnik Planitia (Sputnik Plateau) y sus alrededores, por ser el sitio que presenta los mejores datos y las geoformas superficiales más interesantes. Los diferentes datos de imágenes satelitales, cubos multiespectrales y el modelo digital de elevación fueron transformados a formatos adecuados para su trabajo. Posteriormente, las imágenes fueron divididas en tres grupos según su resolución espacial, los cuales fueron a su vez corregidos y georreferenciados por separado en el sistema de coordenadas Plutón 2000; con estos productos se procedió a definir y describir seis terrenos con base en sus propiedades geomorfológicas. Uno de ellos, Sputnik Planitia, fue analizado con más detalle usando las imágenes de más calidad, donde se diferenciaron dieciocho unidades geomorfológicas que dieron pistas sobre la distribución y configuración de los distintos hielos que conforman la planicie; se prestó especial atención a describir sus característicos patrones poligonales y las geoformas lineales que los delimitan. El siguiente paso consistió en un análisis topográfico con el modelo digital de elevación y mapas de pendientes y aspecto derivados de él; se describió la topografía de los distintos terrenos y sus variaciones, además, se logró delimitar los bloques que conforman las cadenas montañosas de Sputnik Planitia y describir sus cumbres con alturas de más de 3000 metros sobre el nivel base, comparable con las zonas más elevadas de Plutón. Se continuó con el análisis de las firmas espectrales y los mapas de distribución de compuestos, en donde se encontró que en cada terreno predomina un compuesto que por sus propiedades físicas condiciona y explica las geoformas presentes en él, además, fue posible establecer que en Sputnik Planitia convergen los principales compuestos de Plutón: las cadenas montañosas son de H₂O y la matriz de hielos de la

planicie es una solución de $\text{N}_2:\text{CH}_4:\text{CO}$. El último paso consistió en realizar un análisis temporal de cada terreno con base en conteos de cráteres y las relaciones de corte entre terrenos, con esta información se realizó una reconstrucción de los eventos y procesos que dieron forma a la zona de estudio a través del tiempo; se analizaron en profundidad las características que posee Sputnik Planitia y se estableció que un proceso de convección explica de mejor manera los patrones vistos en superficie, con base en esto, se postuló un modelo convectivo ligeramente diferente a los anteriormente planteados, uno sin la existencia de una subducción y con las geoformas de los límites de los polígonos como fuentes de criomagma. Por último, se encontró que los glaciares de Sputnik Planitia están en un proceso de regresión, lo también indica una merma en la actividad interna; este cese de la actividad es producto de la constante pérdida de material de la cuenca sumado a un esfuerzo interno que está levantando la zona de este a oeste, que empezó a actuar en el terreno Sputnik Highlands; si este proceso se mantiene a través del tiempo es inevitable que Sputnik Planitia y su actividad desaparezcan.

Palabras clave: Plutón, Geomorfología planetaria, Ciencias planetarias, Sputnik Planitia, cortezas gélidas.

Abstract

In this work, a detailed analysis of the satellite data obtained in the New Horizons spacecraft flyby over the dwarf planet Pluto was carried out, in order to understand the geological processes that have shaped his gelid crust, and to establish the geological history of his main terrains. Sputnik Planitia (Sputnik Plateau) and its surroundings were selected as the study area, because provided the best data and showed the most interesting surface features. First, the satellite images, multispectral cubes, and digital elevation model (DEM) were transformed into adequate formats in order to process them. Subsequently, the imagery data was divided into three groups by their spatial resolution, corrected and georeferenced in the Pluto 2000 coordinate system. With these images were defined and described six geological terrains based on their geomorphological properties. Sputnik Planitia was examined in more detail using the higher quality images, and within it were defined eighteen geomorphological that provided key information about the distribution and geometries of the various ices that compounds the plain; emphasizing on describing the polygonal features of the plain and the lineal geoforms that delimit them. A topographic analysis was carried out using the digital elevation model and slope and aspect maps obtained from it. Topography of the different terrains was described, also, these map allowed a better appreciation of the shapes of the blocks that conforms the mountain ranges within Sputnik Planitia, and to estimate their height of over 3000 meters over the base level, comparable to the highest lands of Pluto. Complementary studies included the spectral signatures and distribution maps analysis, encountering that in every terrain exist a dominant compound, that because of its physical properties determines and explains the geoforms in it; additionally, it was established that in Sputnik Planitia converges the principal components of Pluto, mountains ranges are made of H_2O and the ices of the plain are a solution of $\text{N}_2\text{:CH}_4\text{:CO}$. The last step consisted in a temporal interpretation of every terrain, based on crater counts and the crosscut relationships between geoforms, a reconstruction of the principal events and processes that shaped the study area across

geological time was made with this information. A further analysis of the Sputnik Planitia features lead to the conclusion that a convective process is the best explanation to the surface patterns observed in Sputnik Planitia, furthermore, it was proposed a convective model slightly different to those previously suggested, one without subduction and with the geoforms that delimit the polygons as the criomagma source. Last, it was established that a regression process has been occurring in Sputnik Planitia glaciers, and therefore a decay in its internal activity; this depletion in the activity is the result of the constant loss of material from the system due to volatilization and an ongoing internal effort that is rising the zone from east to west, and that started in the Sputnik Highlands terrain; if this process continues throughout time, will eventually lead to the end of Sputnik Planitia and its activity.

Key words: Pluto, Planetary geomorphology, Planetary sciences, Sputnik Planitia, icy crusts.

Lista de Figuras

Figura 1-1: Zona de estudio.....	19
Figura 1-2: Metodología	21
Figura 2-1: El espectro electromagnético..	23
Figura 2-2: Radiación solar.....	24
Figura 2-3: Espectro de reflexión de Plutón.	25
Figura 2-4: Modelo de la reflexión sobre una superficie.....	27
Figura 2-5: Configuración del sistema solar exterior.	30
Figura 2-6: Principales propiedades físicas de Plutón.	31
Figura 2-7: Plutón antes de New Horizons.	32
Figura 2-8: Hemisferio de Plutón observado por New Horizons.....	33
Figura 2-9: Mapa de terrenos de Plutón.	34
Figura 2-10: Sputnik Planitia.....	36
Figura 2-11: New Horizons.....	41
Figura 2-12: Diagrama de fase para el H ₂ O.....	47
Figura 2-13: Diagramas de fase para el CH ₄ y N ₂ . e.....	49
Figura 3-1: Carpetas contenidas en un paquete de datos del PDS.....	52
Figura 3-2: Nomenclatura de los paquetes de datos.....	53
Figura 3-3: Estructura interna de un archivo FITS..	53
Figura 3-4: Estructura de un cubo espectral.	54
Figura 3-5: Código utilizado para transformar el formato de los cubos de datos.	55
Figura 3-6: Mosaico de baja definición (LD).	58
Figura 3-7: Mosaico de definición intermedia (MD).....	59
Figura 3-8: Mosaicos de alta definición (HD)..	60
Figura 3-9: Mosaico de alta definición (HD) corregido.	61
Figura 3-10: Mapa base de Plutón con las coordenadas geográficas correspondientes.....	62
Figura 3-11: Modelo esquemático de una operación de vecindad con una ventana rectangular.	64
Figura 3-12: Modelo digital de elevación (DEM).	66
Figura 3-13: Método de toma de datos del instrumento LEISA.....	68
Figura 3-14: Cubo espectral de LEISA..	69
Figura 4-1: Mapa de terrenos definidos para la zona de estudio.....	73
Figura 4-2: Visualizaciones en tres dimensiones de la zona de estudio.....	74

Figura 4-3: Principales geoformas de Voyager terra (VT).....	75
Figura 4-4: Principales geoformas de Cthulhu Regio (CR).. ..	77
Figura 4-5: Principales geoformas de Transitional Terra (TT).....	79
Figura 4-6: Principales geoformas de Sputnik Highlands (TT).	81
Figura 4-7: Principal geoforma de Southern Terra (ST)..	82
Figura 4-8: Mapa de unidades geomorfológicas o fotogeológicas de Sputnik Planitia..	85
Figura 4-9: Visualizaciones en tres dimensiones del área cubierta por el mosaico HD..	86
Figura 4-10: Perfil topográfico de la zona noroeste de SP.....	87
Figura 4-11: Figura del borde noroeste de Sputnik Planitia..	89
Figura 4-12: Figura de la unidad Hillary montes (HM).....	90
Figura 4-13: Bloque más alto de Sputnik Planitia..	91
Figura 4-14: Principal geoforma de la unidad Transitional hills (TH).	93
Figura 4-15: Principal geoforma de la unidad Dark lands (DL).....	94
Figura 4-16: Principales geoformas de la unidad South hillary montes (SHM).....	95
Figura 4-17: Principales geoformas de la unidad Transmons lands (TL)..	96
Figura 4-18: Principales geoformas de la unidad Invaded lands (IL).....	97
Figura 4-19: Principales geoformas de la unidad Tenzing montes (TM).	98
Figura 4-20: Principal geoforma de la unidad Sputnik highlands foothills (SHF).	100
Figura 4-21: Principales geoformas de la unidad Rough Planitia (RP).....	101
Figura 4-22: Geometría de la unidad Inner Planitia block (IPB).	102
Figura 4-23: Principales geoformas de la unidad Dark Planitia (DP).....	105
Figura 4-24: Principales geoformas de la unidad Grey Planitia (GP)..	108
Figura 4-25: Principales geoformas de la unidad Light planitia (LP)..	110
Figura 4-26: Principales geoformas de la unidad Pit lands (PL).....	112
Figura 5-1: Modelo digital de elevación (DEM).	115
Figura 5-2: Mapa de sombras de la zona de estudio.	116
Figura 5-3: Perfil de elevación de Sputnik Planitia.....	119
Figura 5-4: Mapa de pendientes de la zona de estudio.	120
Figura 5-5: Mapa de aspecto de la zona de estudio	122
Figura 6-1: Código utilizado para los cálculos de temperatura.....	125
Figura 7-1: Firmas espectrales de los terrenos.....	128
Figura 7-2: Espectros superpuestos.....	129
Figura 7-3: Mapa de la abundancia de CH ₄ en el hemisferio observado de Plutón.	131
Figura 7-4: Mapa de la abundancia de H ₂ O en el hemisferio observado de Plutón.....	133
Figura 7-5: Mapa de abundancia de CO en el hemisferio observado de Plutón.....	135
Figura 7-6: Mapa de abundancia de N ₂ en el hemisferio observado de Plutón..	136
Figura 7-7: Franja de CO y N ₂ en la imagen de MVIC..	137
Figura 8-1: Edades relativas.....	144
Figura 8-2: Modelo convectivo de Sputnik Planitia..	151

Lista de abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura	Término
SP	Sputnik Planitia
LD	Mosaicos de baja definición (low definition, en inglés)
MD	Mosaicos de definición intermedia (medium definition, en inglés)
HD	Mosaicos de alta definición (high definition, en inglés)
VT	Voyager Terra
CR	Cthulhu Regio
TT	Transitional Terra
ST	Southern Terra
SH	Sputnik Highlands
HBT	High albedo big trench
LBT	Low albedo big trench
HM	Hillary montes
TH	Transitional hills
DL	Dark lands
SHM	South hillary montes
TL	Transmons lands
IL	Invaded lands
TM	Tenzing montes
SHF	Sputnik highlands foothills
RP	Rough planitia
IPB	Inner planitia block
DP	Dark planitia
GP	Gray planitia
LP	Light planitia
PL	Pit lands
DEM	Modelo digital de elevación (digital elevation model, en inglés)

1. Introducción

Esta investigación fue realizada como Tesis de grado para optar por el título de Magister en Ciencias - Geología en la Universidad Nacional de Colombia, la cual se llevó a cabo en un periodo de dos años en las instalaciones de la sede Bogotá. Este trabajo está enmarcado en la línea de investigación de las ciencias planetarias. Todos los datos usados son de libre difusión y fueron analizados enteramente en Colombia.

1.1 Problema de Investigación

Los datos de alta resolución para superficies de cuerpo gélidos en el sistema solar han sido proporcionados por sondas como Galileo, Cassini, MRO (Prockter, 2005) y recientemente New Horizons. Esta última realizó la toma de imágenes satelitales de alta resolución espacial y obtuvo cubos multispectrales con gran cubrimiento espectral (H. A. Weaver & Stern, 2008), estos datos mostraron características únicas de la superficie de Plutón. Entre las zonas más interesantes se encuentra Sputnik Planitia (SP), una planicie de 900.000 Km² de área superficial cuya superficie está cubierta por fracturas en arreglos poligonales y lineamientos que representan varios patrones estructurales. Además, se han encontrado geoformas que parecen ser flujos de material líquido o plástico proveniente de dichas fracturas (Stern et al., 2015). Esta geoforma fue en primera instancia llamada Sputnik Plateau, ya que cuando se vio por primera vez se creyó que era una zona más alta que sus alrededores, más a medida que se realizó un análisis detallado se descubrió que en realidad se encuentra más abajo que los terrenos circundantes, de modo que su nombre fue cambiado a Sputnik Planitia (White et al., 2017), el cual será usado en este trabajo.

Las características geológicas avistadas apenas han sido descritas muy someramente y de manera muy general (Stern et al., 2015), pero si se quiere llegar a comprender los procesos geológicos que actúan sobre todo Plutón y como han evolucionado en el tiempo,

es indispensable la definición de procesos a escala local. Por lo tanto, en este trabajo se analizó a profundidad cada uno de los componentes de la región Sputnik Planitia y sus alrededores, ya que hasta este momento los estudios realizados no contemplan algunas propiedades morfológicas y geológicas que pueden ser claves para tener un mejor entendimiento de la geología regional.

Tampoco se entiende claramente cuál es el mecanismo interno que está provocando estas deformaciones, o el responsable de la posible producción de material en la superficie de Sputnik Planitia. Se han realizado algunos modelamientos físicos utilizando el número de Rayleigh que apuntan a una probable convección (Trowbridge, Melosh, Steckloff, & Freed, 2016), este modelo predice una convección fácilmente alcanzable y dependiente de la profundidad de la Sputnik Planitia. Con este trabajo se buscó evaluar estas hipótesis con base en el estudio geológico de la zona.

1.2 Preguntas del proyecto

Para este trabajo se plantearon dos preguntas principales que guiaron los análisis realizados. Para las características externas: ¿Cuáles son los distintos tipos de materiales que se encuentran en la superficie de Plutón, y cómo se comportan ante las condiciones tectónicas, geográficas y atmosféricas que los afectan?, y con respecto a las dinámicas internas: ¿Qué procesos internos en Plutón están dando forma a los patrones geomorfológicos que se observan en la superficie?

1.3 Motivación

Las preguntas del proyecto surgieron al observar unos patrones de flujo y un fracturamiento muy peculiar en algunas regiones de Sputnik Planitia, especialmente hacia la zona central de esta planicie, y que fueron vistas en las primeras imágenes enviadas por la sonda New Horizons en 2015. Estas características hacen de Plutón un lugar donde ocurren procesos geológicos únicos en el sistema solar, en gran parte debido a los materiales que están interactuando y las condiciones físico-químicas a las que están sometidos, dominadas por temperaturas cercanas al cero absoluto y expuestas a una atmósfera activa pero leve (Young et al., 2018). Su estudio puede significar la caracterización de nuevos procesos

geológicos, o al menos el establecimiento de un análogo de procesos ya conocidos, bajo condiciones totalmente distintas a las habituales en cuerpos rocosos como la Tierra.

1.4 Objetivo General

Reconocer parámetros físicos como temperatura superficial, presión atmosférica e insolación, y las características geológicas más influyentes en el desarrollo de las geoformas en la superficie de Plutón, para así plantear qué tipo de procesos internos y externos formaron la planicie denominada Sputnik Planitia, y lograr establecer la evolución geológica de la zona.

1.5 Objetivos específicos

- Reconocer procesos como flujos de material, tectonismo, avalanchas y otras expresiones que muestren una dinámica externa en Sputnik Planitia y sus inmediaciones, de manera que se puedan establecer relaciones de corte y patrones estructurales; además, buscar similitudes con procesos que ocurran en nuestro planeta para así comprender como varían las dinámicas de un sistema a otro.
- Utilizar parámetros morfométricos como altura, pendiente, aspecto y curvatura para analizar las características topográficas de la superficie y su relación con la geomorfología de la zona.
- Usar métodos de datación de superficies planetarias como conteo de cráteres (Michael & Neukum, 2010), y ordenar los eventos geológicos reconocidos, de manera que se establezca una historia geológica.

1.6 Justificación

La tecnología empleada en las sondas espaciales ha venido mejorando en los últimos años; las cámaras de mayor resolución y los espectrógrafos más potentes han abierto un gran rango de posibilidades en cuanto al descubrimiento y entendimiento de la geología en otros cuerpos del sistema solar. Esto plantea un amplio y novedoso campo para la creación de conocimiento, permitiendo entender mejor los procesos geológicos cuando ocurren en cortezas con materiales no silicatados y en condiciones que son totalmente distintas a las que se someten las rocas en la Tierra.

El procedimiento empleado en esta tesis puede servir para complementar estudios en varias áreas: descripción de casquetes glaciares de varios tipos, definición de ambientes extremos donde podría encontrarse vida, búsqueda de planetas extrasolares, y cualquier otro tipo de investigación que pueda verse vinculado a cuerpos de roca y material a muy bajas temperaturas. El entendimiento de estos cuerpos puede considerarse como un análogo muy útil de problemas en nuestro propio planeta, debido a que en la escala global la criósfera representa una parte importante del sistema climático de la Tierra.

Este proyecto es un paso adelante para el desarrollo de estudios en el área de las ciencias planetarias en Colombia. Estas disciplinas (en especial las que conciernen a geología) han sido poco desarrolladas en nuestro país, y demostrar la posibilidad de realizar este tipo de proyectos es importante para el progreso y ampliación de las Geociencias en Colombia.

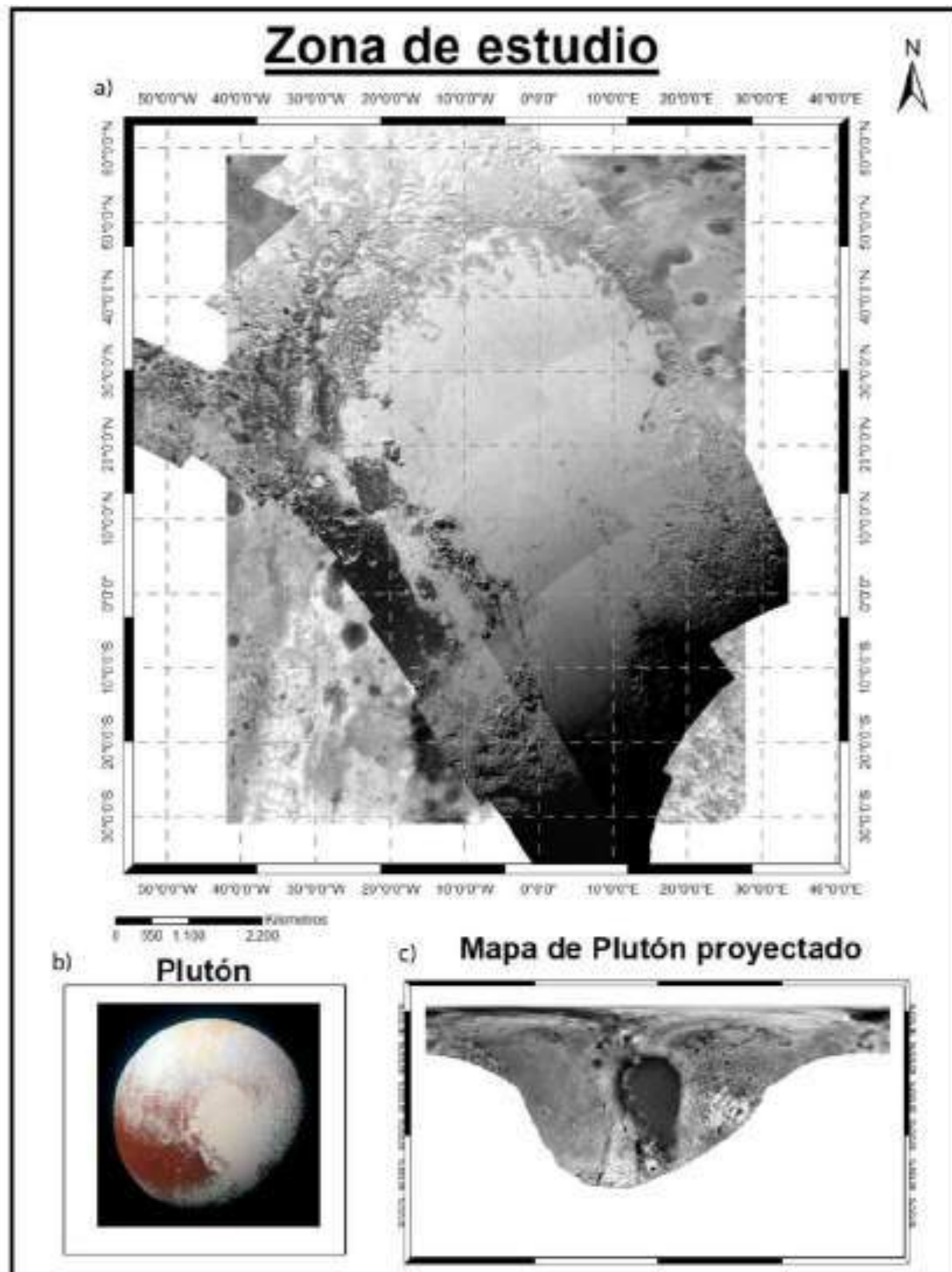
1.7 Área de estudio

La zona de Sputnik Planitia se extiende por más de 1400 kilómetros en su dimensión de mayor longitud por la superficie de Plutón. En su parte central las geoformas son muy regulares y se repiten constantemente; esto cambia hacia los bordes de la planicie, donde se pueden observar varias interacciones con otros materiales y terrenos de Plutón (parte norte de la **Figura 1-1**).

La parte de Sputnik Planitia que parece mostrar la mayor complejidad se encuentra hacia el margen oeste de la misma (**Figura 1-1**). El material con textura lisa de la planicie se encuentra en contacto con materiales más rugosos hacia el occidente y el norte. Dentro del mismo se pueden observar las ya mencionadas fracturas poligonales y las geoformas lineales que están claramente asociadas a ellas.

Esta ha sido escogida como la zona de estudio debido a su complejidad geológica; se observaron materiales de diferentes características que están interactuando entre ellos, formando distintos patrones geomorfológicos. La zona se extiende desde los 60° Norte a los 30° Sur, y de 40° oeste a 30° este, en la grátícula para el geoide establecido en Plutón.

Figura 1-1: Zona de estudio. **a)** Se muestra la zona escogida para este trabajo, se extiende desde los 60° Norte a los 30° Sur, y de 40° oeste a 30° este. Debajo está el recorte del DEM y arriba los mosaicos de todas resoluciones **b)** Abajo a la izquierda hemisferio observado de Plutón, **c)** abajo a la derecha mapa de Plutón en coordenadas planas.



1.8 Metodología

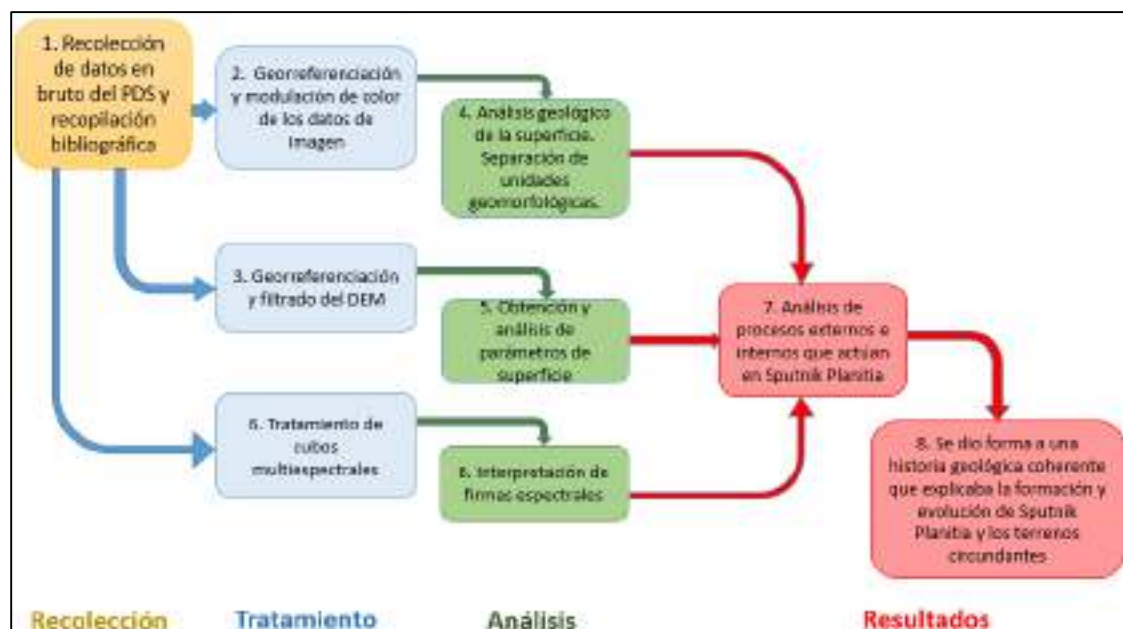
La metodología utilizada en este trabajo es explicada en gran detalle a través del documento, este apartado busca presentar un resumen conciso de las fases que tuvo el proyecto y los principales pasos que se siguieron **Figura 1-2**.

- **Fase 1:** Se recolectaron los datos en bruto con los cuales se trabajó, los datos tomados por la sonda New Horizons se consiguieron del sitio web PDS de NASA (Planetary Data System); de este paquete de información se utilizaron tres tipos de datos, las imágenes pancromáticas de alta resolución capturadas por el instrumento LORRI, imágenes multiespectrales de menor resolución tomadas por el instrumento MVIC, y cubos hiperspectrales del instrumento LEISA. El modelo digital de elevación (DEM) a 300 metros/pixel se obtuvo de la página web del USGS (United States Geological Service).
- **Fase 2:** Las imágenes originales venían como mosaicos separados por fecha y hora de su toma, estos fueron agrupados según su resolución y cubrimientos espacial. Una vez se definieron grupos de imágenes con el criterio anterior se aplicaron dos tipos de correcciones a los datos, una de georreferenciación para pasar de unos datos sin ubicación espacial en a una representación referenciada de los mismos, de modo que se pudieran realizar medidas adecuadas de la superficie; y otra fotogramétrica, para modular a tonalidades homogéneas todas las imágenes, ya que al ser las capturas realizadas a distintos ángulos ocurre una diferencia en la iluminación.
- **Fase 3:** Se realizó el procesamiento del DEM de la zona, en primer lugar, se realizó un proceso de ortorectificación para corregir su posición de modo que concordase con las imágenes de LORRI. Posteriormente, se realizaron varios procesos de filtrado para suavizar la topografía y eliminar cierta cantidad de ruido en los datos; este proceso se realizó una vez a todo el DEM y una segunda al área de Sputnik Planitia, la cual presentaba un ruido más fuerte que el resto de las zonas.
- **Fase 4:** Análisis geológico de la superficie. Caracterización de rasgos superficiales y separación de unidades geomorfológicas. Se utilizaron como principales criterios de discriminación el albedo, la textura, la topografía y en algunos casos la densidad de cráteres.
- **Fase 5:** Se obtuvieron parámetros morfométricos a partir del DEM, con ellos se generaron mapas de pendientes y aspecto. Los tres componentes anteriores fueron

analizados a detalle para complementar la definición de los terrenos a partir de las características físicas de la superficie.

- **Fase 6:** Se obtuvieron unas firmas espectrales puntuales en cada uno de los terrenos para conocer las composiciones aproximadas de los materiales, estos datos se complementaron con mapas de distribución y abundancia de otros autores para luego relacionarse con la reología de los materiales y su papel en las geoformas superficiales.
- **Fase 7:** Con toda la información recolectada se procedió a postular que procesos internos y externos están influenciando la zona y cuál es su relevancia, los últimos se basaron en la interacción de parámetros físicos como la temperatura, densidad, reología y el grosor de las capas geológicas en profundidad, haciendo conexión con los eventos que forman las características vistas en superficie.
- **Fase 8:** Se dio forma a una historia geológica general y coherente, explicando la formación y evolución de Sputnik Planitia; esta secuencia de evento se interpretó a partir de los principales eventos geológicos identificados y como las dinámicas internas actúan a través del tiempo.

Figura 1-2: Metodología. Esquema de los pasos seguidos en la realización del proyecto según el tipo de actividad realizada.



2. Marco teórico

El estudio y trabajo en ciencias planetarias requiere comprender conceptos poco convencionales además de los conocimientos básicos de geología, entre ellos las condiciones fisicoquímicas específicas del cuerpo planetario objetivo y el funcionamiento de los sistemas electrónicos de las sondas espaciales, estos aspectos astronómicos son básicos para realizar modelamientos digitales e hipótesis sobre los procesos en otros planetas, como es el caso de este trabajo.

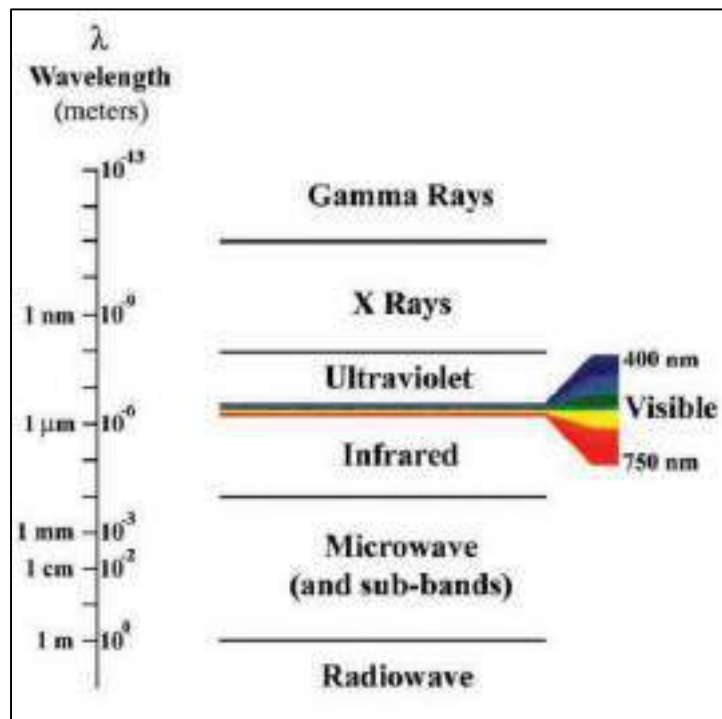
2.1 El espectro electromagnético

El espectro electromagnético es la distribución energética que pueden poseer las ondas electromagnéticas, es decir, todas aquellas que pueden viajar en el vacío, a la velocidad de la luz y que son transmitidas por medio de fotones (Rees, 2012). Estas ondas pueden ser clasificadas con base en su longitud de onda o en su frecuencia (son propiedades físicas inversas), lo cual también estará relacionado a su capacidad energética y por consiguiente con su fuente de emisión. El espectro no posee límites fijos o definidos (Richards & Jia, 2006), su estructura se puede ver en la **Figura 2-1**.

El tipo de ondas electromagnéticas emitidas dependerán de las características físicas de dicho objeto. Debido a que el objetivo de este trabajo es estudiar un cuerpo del sistema solar, la radiación más relevante es aquella proveniente del Sol y la reflejada por el cuerpo.

El Sol emite energía en un amplio rango del espectro electromagnético, pero su pico de emisión se encuentra en el rango visible, 450-700 nanómetros (nm) (Rees, 2012). Este comportamiento puede ser reproducido por medio de la relación de radiación del cuerpo negro de Planck, ya que el Sol se comporta como un cuerpo negro (Delgado-Correal & Garcia, 2012). Si se conoce la temperatura superficial solar es posible recrear la emisión del Sol, como se muestra en el ajuste de la **Figura 2-2**, hecha con datos observacionales.

Figura 2-1: El espectro electromagnético. Diferentes partes del espectro electromagnético, a la derecha se muestran las longitudes de onda con el cual se clasifica y diferencia.

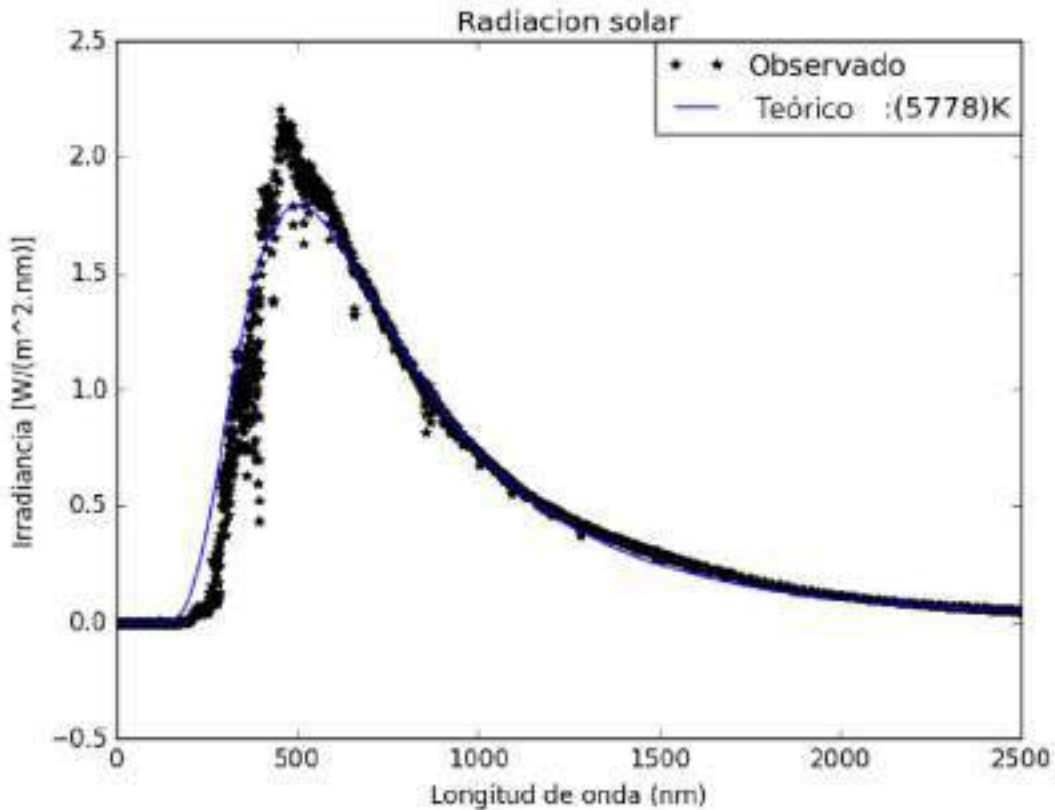


Fuente: (Richards & Jia, 2006).

2.1.1 Espectros de reflexión y emisión

La **Figura 2-2** muestra lo que se conoce como un espectro de emisión. Estas graficas enfrentan la cantidad de energía que está saliendo de un cuerpo (irradiancia) por la longitud de onda; cada objeto que emite energía lo hace con un patrón diferente, dependiendo principalmente de su temperatura y composición (Siegel & Howell, 1971). La mayoría de planetas y asteroides no emiten gran cantidad de energía propia desde su interior, pueden emitir mucho calor almacenado durante el día, pero este es un relicto de la energía que llega del Sol (Randall, 2010).

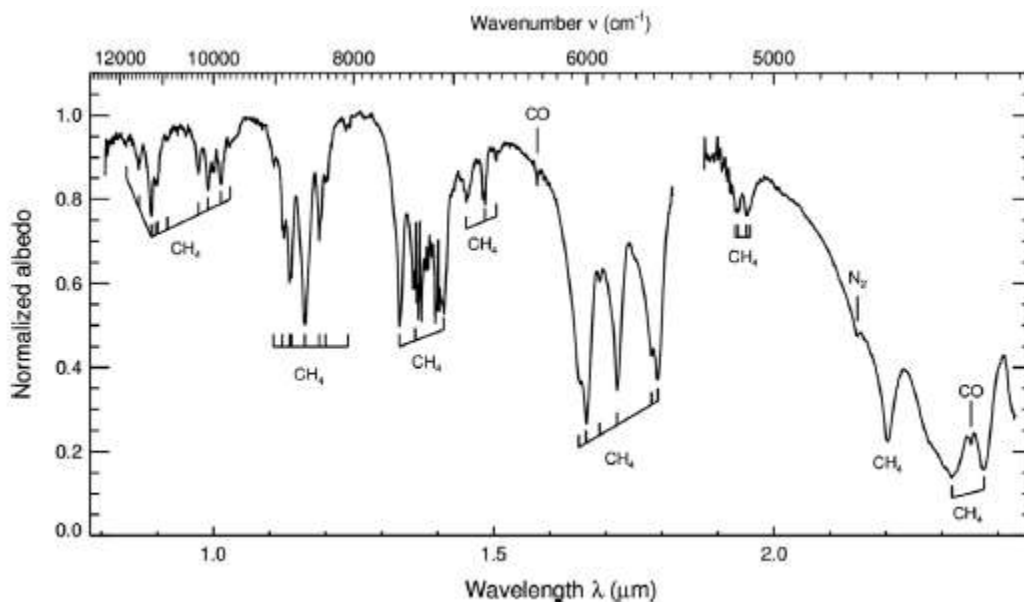
Figura 2-2: Radiación solar. Ajuste de datos de irradiancia tomados directamente del sol a una función basada en la ecuación del cuerpo negro (línea azul).



Fuente: Los datos fueron tomados de (Gueymard, 2004), basado en (Delgado-Correal & Garcia, 2012).

Para el resto de cuerpos que emiten poca energía, y que a su vez son el principal objeto de estudio de las ciencias planetarias, existen otros tipos de espectros que permiten su estudio, los cuales son conocidos como espectros de reflexión (Richards & Jia, 2006). Como se mencionó anteriormente, toda la luz emitida por el Sol termina interactuando con los otros astros de sistema solar, y principalmente con sus superficies. La radiación que llega a la superficie de un planeta sufre dos procesos principales: absorción y reflexión. El primero consiste en energía que es capturada por la superficie y es almacenada, mientras que el segundo consiste en energía que es devuelta al espacio, esta porción devuelta es conocida como albedo o reflectancia (Richards & Jia, 2006); al igual que la emisión de energía, esta propiedad también es dependiente de la longitud de onda, por lo cual es contra esta medida que se generan los espectros de reflexión.

Figura 2-3: Espectro de reflexión de Plutón. Sumatoria de espectros de reflexión para Plutón obtenidos por diez años desde la Tierra, los compuestos mostrados en la gráfica indican los principales picos de absorción para esa especie, y por consiguiente los compuestos abundantes en la superficie del planeta enano.



Fuente: (Cruikshank et al., 2015).

La reflectancia es una propiedad que está estrechamente relacionada con la composición química y el estado físico de una superficie, por lo cual el espectro de reflexión es una herramienta muy importante y en muchos casos la única disponible que permite la identificación de superficies planetarias (Khorram, Koch, van der Wiele, & Nelson, 2012). La **Figura 2-3** muestra un espectro de reflexión de Plutón (Cruikshank et al., 2015), en donde el albedo es una magnitud que representa la cantidad de luz reflejada por una superficie; si es más cercano a 1 indica que la superficie refleja más luz en esta franja del espectro, y cuando se acerca a 0 representa una región donde se retiene energía, este último caso se conoce como pico de absorción. El espectro de reflexión es afectado por todas las especies químicas que estén involucradas en la superficie que se observa, debido a esto cada espectro puede cambiar mientras hayan mezclas y proporciones distintas entre los compuestos (Cruikshank et al., 2015).

2.2 Reflectancia

El albedo o reflectancia es la cantidad de radiación que una superficie es capaz de reflejar con respecto a la radiación que le llega, siendo esta diferente a la radiación emitida por un cuerpo. La radiación que se observa en la mayoría de planetas y asteroides son producto de la reflexión de luz proveniente del Sol, este fenómeno es constante en todo el espectro electromagnético, por lo cual la reflectancia es una herramienta muy útil para el estudio de superficies planetarias (Beyer, 2014).

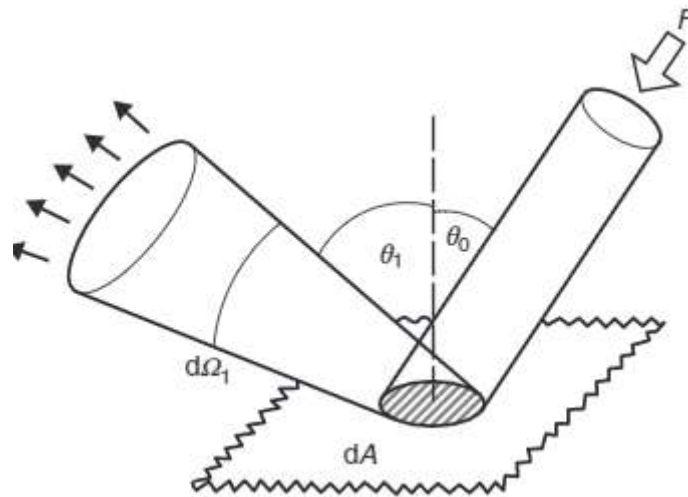
El proceso ocurre cuando la luz incide sobre una superficie con cierto ángulo (θ_0 en la **Figura 2-4**), este ángulo dependerá de la posición de la fuente emisora, para el caso de Plutón la fuente es el Sol y su posición durante la toma de datos es relevante. La parte de la luz incidente que es reflejada no lo hará como un rayo único sino como un área de dispersión, la reflectancia en el área que cubre todos los lugares posibles de reflexión se conoce como albedo difuso o hemisférico, este representa de manera más real la ratio entre incidencia y reflexión (Rees, 2012) y (Rycroft, 2017).

La reflexión puede variar entre dos tipos dependiendo de la superficie que se esté estudiando; la primera es la forma especular y se da en superficies lisas, donde la reflexión se da como en un espejo con un rayo único saliente. Por otro lado, está la reflexión lambertiana, la cual ocurre en superficies que son rugosas y se comporta de una manera similar al albedo hemisférico. Para conocer de qué manera se comporta una superficie se usa el criterio de Rayleigh (Rees, 2012), el cual mide qué tanto refleja una superficie cualquiera en comparación a una superficie lambertiana perfecta; utilizando este parámetro se sabe que para que una superficie refleje de manera especular en el visible debe ser plano y no tener imperfecciones de más de 60 nanómetros. Dado que estas condiciones solo se pueden dar de manera artificial, se consideró que para el caso de Plutón ocurre una reflexión lambertiana en los rangos del visible y el infrarrojo.

Muchas superficies tienden a absorber una cantidad importante de la radiación que los intercepta. Para el caso de la nieve y el hielo esta cantidad es pequeña en el visible, los materiales gélidos suelen atrapar burbujas de gas en su interior y su estructura no es compacta, la luz que los atraviesa se verá reflejada en cada lamina que compone estos materiales, por lo cual el albedo total tendrá un valor alto. Por otro lado, partículas orgánicas complejas, como los “tholins” (Poch et al., 2016), absorben más cantidad de luz, haciendo que las superficies que recubren tengan un menor albedo.

La reflectancia suele ser representada con un porcentaje o un valor entre 0 y 1, donde entre más alta sea la porción de energía reflejada mayor será el valor del albedo. Esta medida es una magnitud adimensional, debió a que es una ratio entre energía recibida y reflejada. Esta medida es dependiente de la longitud de onda, lo que significa que para cada parte del espectro el valor de la reflectancia será diferente para una misma superficie (Rees, 2012).

Figura 2-4: Modelo de la reflexión sobre una superficie. La imagen representa el proceso de reflexión de un haz de luz sobre una superficie dA , El haz de luz F entra con un ángulo θ_0 , parte de la energía inicial se absorbe y parte se refleja de manera difusa con un ángulo θ_1 .



Fuente: (Rees, 2012).

El albedo se ve afectado por distintas propiedades físicas de la superficie y el medio; incluyendo el tamaño de grano de las partículas y la temperatura a la que se encuentra, usualmente la influencia que tendrá será cambiar la magnitud del albedo en pequeñas cantidades, a veces importantes a escala planetaria.

La reflectancia también es influenciada por efectos externos como la interacción atmosférica y el ángulo de incidencia de la luz solar. Las atmósferas son medios con composiciones específicas, de modo que absorberán y reflejarán luz de manera distinta según sus propiedades. Dado que los datos de sensores remotos son tomados desde espacio, en ciertos cuerpos como la Tierra la atmósfera juega un papel importante por su grosor y complejidad, siendo necesario realizar unos ajustes a la función de reflectancia para corregirla. Para el caso de Plutón esta consideración no es necesaria, ya que, aunque

posee una atmósfera, esta es tan delgada que su efecto sobre los espectros superficiales es despreciable.

Para Plutón es necesario tener otra consideración adicional, al ser este tan pequeño la curvatura del planeta enano provoca que lleguen diferentes cantidades de luz a través de su superficie, haciendo que ciertos lugares no sean iluminados. El problema reside en que este efecto es captado por las imágenes de New Horizons y por lo tanto afectará las medidas que se realicen, es necesario hacer una corrección que elimine este efecto.

La reflectividad de cada material suele ser única y característica de dicha especie, además variará dependiendo de la longitud de onda en que sea medida; sumando estas dos cosas se tiene que cada compuesto, elemento o superficie, tendrán un espectro de reflexión único e invariable a las mismas condiciones, el cual se conoce como firma espectral de reflectancia. Esta cualidad es útil para diferenciar compuestos y superficies por medio de sensores remotos, en especial cuando se tienen datos en diferentes partes del espectro electromagnético (Rycroft, 2017).

2.3 Plutón

2.3.1 Historia

El descubrimiento de Plutón ocurrió de manera similar a Neptuno, ya que la existencia de ambos fue predicha antes de ser encontrados. el estar ambos tan alejados de la Tierra provoco que fuera difícil encontrarlos observacionalmente. Para diferenciar un planeta de una estrella hace falta observar si el astro se mueve a intervalos regulares por la bóveda celeste, cosa que no hacen las estrellas, resultando un proceso laborioso y casi aleatorio hace 100 años. Por otro lado, el comportamiento de las órbitas planetarias era algo bien conocido y en su estudio se encontraron perturbaciones en las órbitas de los planetas ya conocidos, estas solo podían ser producto de la influencia de una gran masa generando perturbaciones gravitacionales, la conclusión más lógica era pensar en la existencia de planetas más allá de la órbita de Urano.

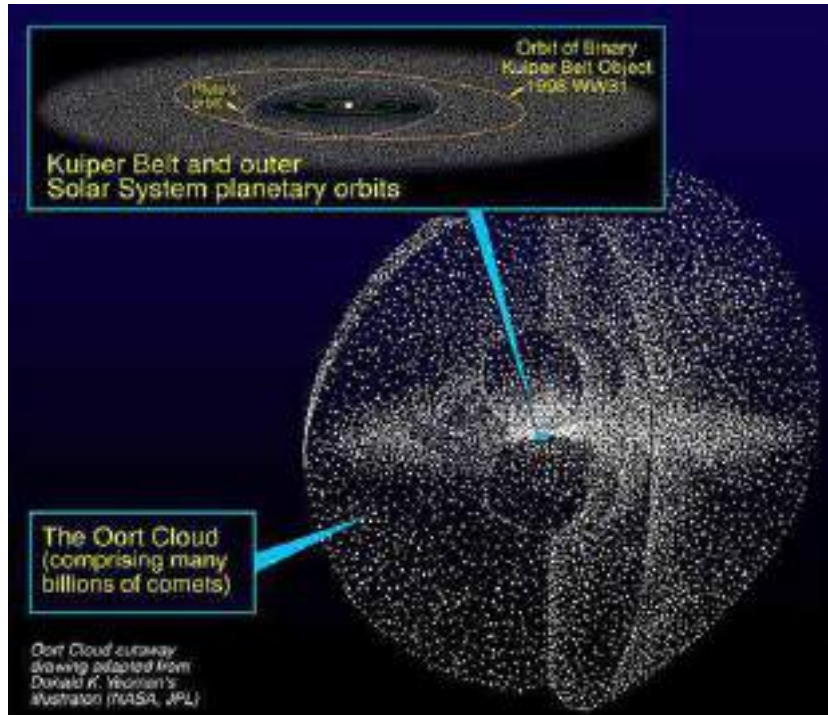
Percival Lowell fue el primero en detectar estas anomalías orbitales producto de un supuesto noveno planeta, poco después se dio a la tarea de calcular la órbita hipotética de dicho planeta y empezar su búsqueda por medio de telescopios. No fue hasta el año 1930 cuando Clyde Tombaugh, realizó observaciones del tan buscado noveno planeta, cuyo nombre fue otorgado en alusión al dios romano del inframundo. Curiosamente, los cálculos

de Lowell estaban hechos con base a un planeta con 10 veces la masa de la Tierra, mientras que en la realidad la masa de Plutón es solo de 0,0024 veces la masa de nuestro planeta, por lo cual su descubrimiento podría considerarse como un evento hasta cierto punto fortuito (Schmude, 2008).

Plutón siempre ha estado ligado al Cinturón de Kuiper desde su descubrimiento. Para 1950 los cometas eran objetos interesantes por estudiar, sus extrañas órbitas hacían pensar que debía existir algo más allá de los 9 planetas. Estos cometas se alejan bastante del sistema solar siguiendo órbitas con muy variados ángulos de inclinación, eventualmente se encontró que aquellos con las órbitas más excéntricas provienen de los límites del sistema solar, una esfera conocida como Nube de Oort. Otros cometas con periodos orbitales más cortos y órbitas menos excéntricas debían de venir de una zona más cercana y regular, Gerald Kuiper postuló que estos provenían de un cinturón de pequeños cuerpos ubicado más allá de Neptuno, argumentando que cierta cantidad de masa debió alejarse del sistema solar interior en sus épocas iniciales, llegó a esta conclusión al comparar la composición de los planetas con el Sol, y además, basándose en la idea de Kenneth Edgeworth de que era poco probable que el sistema solar terminara de manera abrupta con Neptuno (Schmude, 2008). Hoy se conoce a esta región como cinturón de Kuiper y de esta manera se obtuvo una visión clara de la configuración del sistema solar exterior **(Figura 2-5)**.

Para el año 1990 la tecnología había avanzado lo suficiente como para que se pudieran observar los cuerpos de este cinturón de Kuiper, permitiendo que se descubriesen gran cantidad de cuerpos que confirmaban la existencia del cinturón, pero también resultó que estos orbitaban cerca de Plutón y llegaban a tener masas similares, lo que abrió el debate de si los recién descubiertos serían clasificados como planetas, o por el contrario, si Plutón debería bajar de categoría. La discusión se prolongó hasta el año 2006 cuando Michael Brown y su equipo encontraron a Eris, un cuerpo en el cinturón de Kuiper que supera en tamaño al mismo Plutón, después de esto, la tesis de Plutón como planeta fue insostenible y se decidió dar una definición clara al concepto de planeta: a) estar en una órbita casi circular alrededor del Sol, b) tener una forma prácticamente circular, c) haber limpiado su órbita de otros cuerpos similares (Elkins, 2006). Con base en este criterio, el sistema solar quedó definitivamente confinado a tener ocho planetas.

Figura 2-5: Configuración del sistema solar exterior. Plutón y el cinturón de Kuiper orbitan pasando los planetas gigantes; a mayor distancia se encuentra la nube de Oort, el límite final del sistema solar.



Fuente: (William Crochot, 2013).

2.3.2 Observación y estudio

Plutón ha sido estudiado de manera muy precisa en cuanto a sus cualidades orbitales y sus características físicas generales (**Figura 2-6**), por ejemplo, se sabe que por lo elíptica de su órbita Plutón llega a estar más cerca del Sol que Neptuno; también, gracias a imágenes del Telescopio Espacial Hubble – HST (siglas en ingles) se supo que Plutón se encuentra en un sistema de cuerpos múltiples junto a Caronte, Nyx e Hidra, siendo las últimas dos son pequeños satélites orbitando alrededor de Plutón y Caronte; la llegada de New Horizons dejó el descubrimiento de otros dos satélites naturales muy pequeños, Cerbero y Estigia (Stern et al., 2015). Con Caronte la interacción es más complicada, ya que este satélite tiene un diámetro (1208 km) y masa un poco superiores a la mitad de las de Plutón, el efecto gravitacional es tan grande que el baricentro del sistema queda por fuera de Plutón, y por esta razón se les considera como un sistema planetario doble (Burns,

2004). Esta relación podría tener gran relevancia en la actividad geológica de ambos cuerpos.

Figura 2-6: Principales propiedades físicas de Plutón.

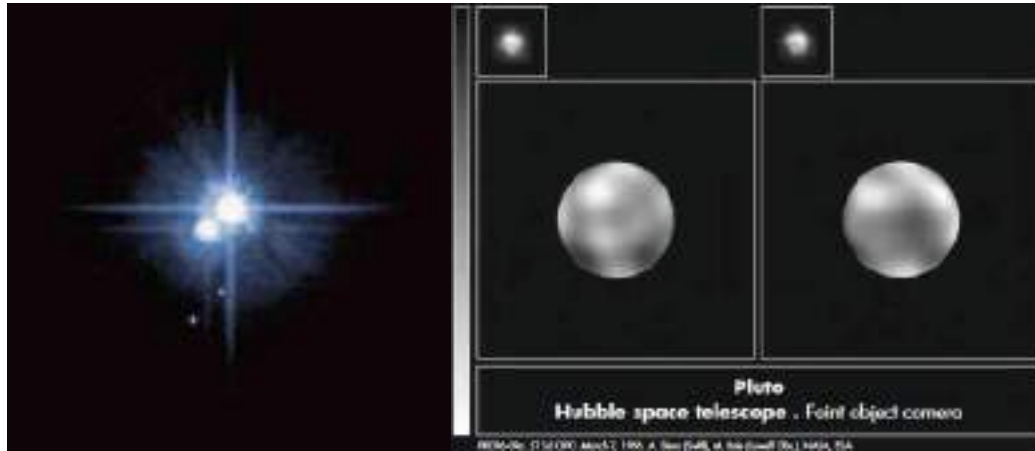
CARACTERISTICA	VALOR
Radio	1187 Km
Área superficial	$1.77 \times 10^7 \text{ Km}^2$
Masa	$1.305 \times 10^{22} \text{ Kg}$
Densidad	1.860 g/cm^3
Periodo de rotación	6.387 días
Periodo de revolución	248 años
Inclinación	57.5º
Distancia promedio al sol	39.5 UA
Distancia promedio a la Tierra	38.5 UA
Inclinación orbital	17º
Excentricidad de la órbita	0.25
Albedo geométrico promedio	0.55
Satélites	Caronte, Hidra, Nyx, Cerbero y Estigia

Fuente: Modificado de (Schmude, 2008).

Las mejores imágenes que se tenían de Plutón fueron tomadas por el telescopio espacial Hubble (**Figura 2-7**), y aunque permitieron caracterizar la compleja relación orbital con sus satélites, la calidad era simplemente demasiado baja para pensar en análisis geológicos. Muchas veces se le comparó con Tritón, satélite natural de Neptuno, por sus propiedades físicas similares y su afinidad composicional, debido a que los espectros de ambos mostraban grandes cantidades de N_2 y CH_4 .

New Horizons significó un salto en el estudio de Plutón y Caronte, con ella se pudo pasar de un análisis astronómico a uno geológico, ya que gracias a las primeras imágenes fue posible realizar una gran cantidad de consideraciones geológicas, las cuales están siendo actualmente refinadas y complementadas por varios equipos de investigación.

Figura 2-7: Plutón antes de New Horizons. A la izquierda Plutón, Caronte y sus demás satélites, a la derecha mejor imagen de Plutón hasta el año 2015.



Fuente: (Schmude, 2008).

2.3.3 Geología de Plutón

2.3.3.1 Geomorfología

Como se mencionó anteriormente, la llegada de New Horizons significó un comienzo en el estudio geológico de Plutón, imágenes de alta calidad se obtuvieron tan solo en el hemisferio del planeta enano opuesto a Caronte, con resoluciones que van desde 2 km por pixel hasta 77 metros por pixel, para el resto de Plutón se cuenta con una resolución máxima de 22 kilómetros por pixel (H. A. Weaver & Stern, 2008), lo que lo hace poco atractivo para un análisis geológico detallado; por suerte el hemisferio captado a alta resolución contiene una gran variedad de geoformas (**Figura 2-8**).

El primer paso fue la separación de la superficie de Plutón en “terrenos”, en este caso, estas regiones fueron delimitadas por criterios geomorfológicos: su textura, color, luminosidad y la continuidad de sus límites. Una buena división fue realizada por Stern et al., 2015 como se muestra en la **Figura 2-9**, los nombres dados son actualmente informales, pero son usados ampliamente en la comunidad científica. Se observaron una gran variedad de superficies en estas imágenes, hacia el norte, desde unos 45° de latitud los terrenos muestran una textura rugosa y en general homogénea, se observaron una gran cantidad de cráteres de impacto y algunos valles lineales llamados *grooves*. Estas regiones presentan distintas tonalidades que varían entre azul, rojo y amarillo; dichas coloraciones son producto de la sublimación y transporte de hielos volátiles y la presencia

de *tholins*, complejas partículas orgánicas que han sido alteradas por la radiación solar (Stern et al., 2015). Hacia la parte noreste del planeta se encuentra una amplia región que fue llamada “*bladed terrain*” por componerse de colinas muy escarpadas que se intercalan regularmente con valles longitudinales, asemejándose a la forma de una espada, lo importante de ellas es que parecen ser producto de un esfuerzo tectónico a gran escala (J M Moore et al., 2015).

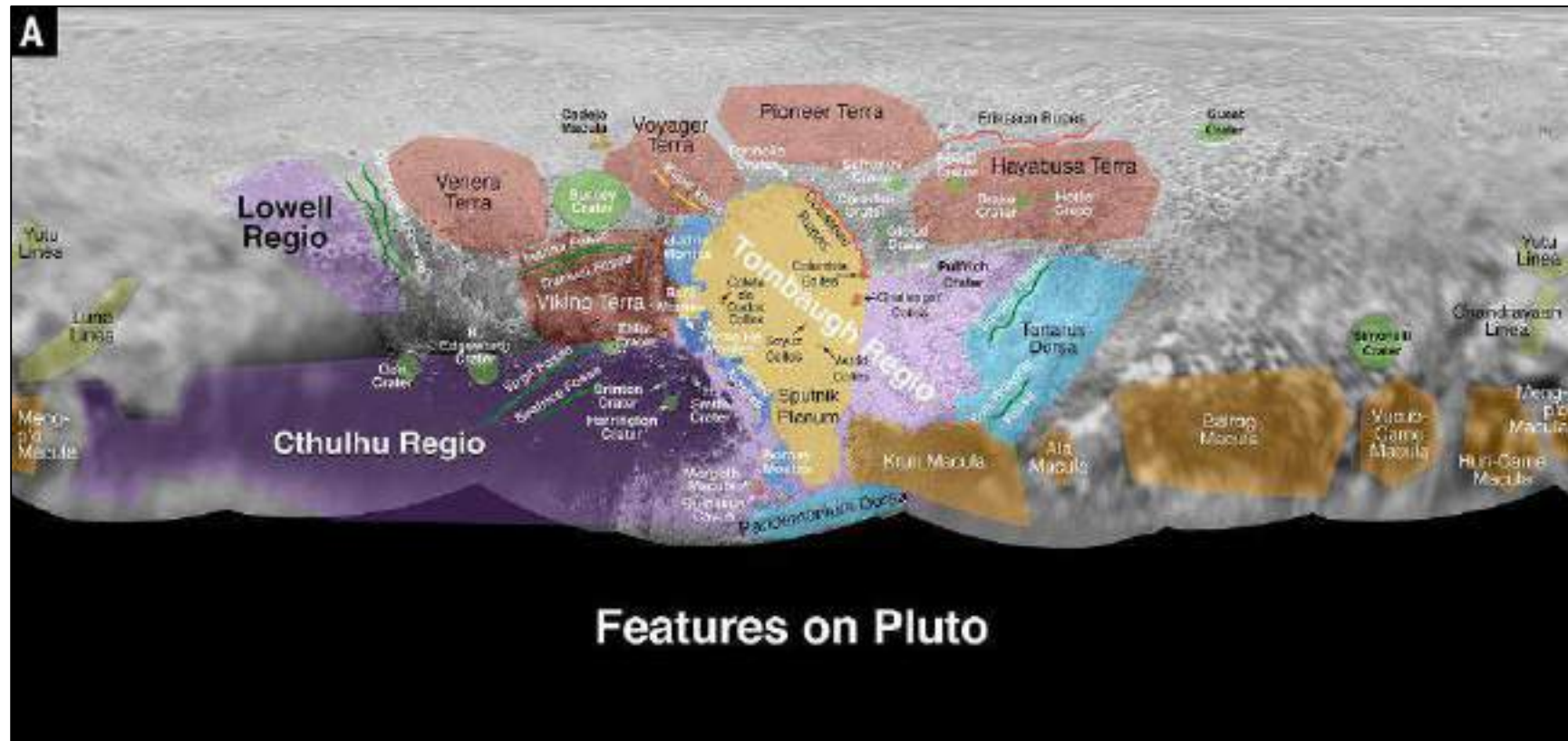
Figura 2-8: Hemisferio de Plutón observado por New Horizons. Imagen capturada con el instrumento MVIC.



Fuente: (Stern et al., 2015).

Dentro de los terrenos que se han definido otros autores destacan dos por sus peculiaridades geológicas, Cthulhu Regio y Tombaugh Regio. El primero de ellos es interesante por su marcada coloración rojiza, se ubica en el hemisferio sur de Plutón y se extiende por una amplia área, su textura es rugosa y posee más cráteres y fracturas en comparación con los terrenos del norte, esta coloración rojiza-marrón parece ser una capa de material que suprayace de manera homogénea a las geoformas iniciales, lo más probable es que se trate de una película gruesa de *tholins* que se han venido depositando regularmente sobre toda esta región (J M Moore et al., 2015).

Figura 2-9: Mapa de terrenos de Plutón. Se muestran las principales regiones identificadas en una etapa temprana de investigación, en el centro se ubica la zona con imágenes de alta calidad.



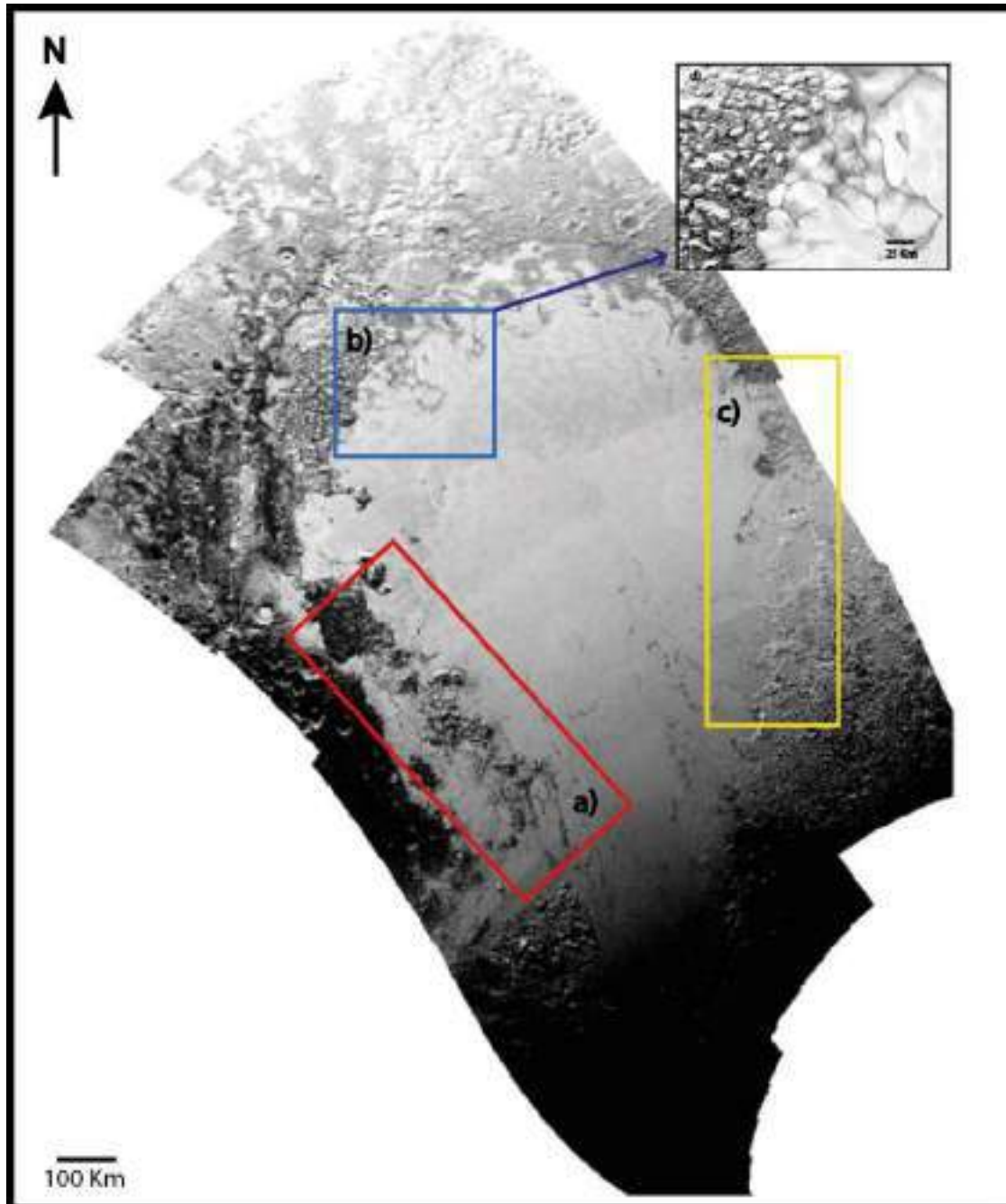
Fuente: (Stern et al., 2015)

En primera medida Tombaugh Regio resultó ser el terreno más interesante por la complejidad de su parte izquierda, Sputnik Planitia. Esta amplia planicie se extiende desde cerca al polo sur hasta alrededor de 40° de latitud Norte. A gran escala es fácilmente diferenciable del resto de terrenos por su superficie prácticamente lisa, carece totalmente de cráteres lo que indica que su superficie es muy reciente con una edad calculada de 10 millones de años (Stern et al., 2015). Toda la región representa una depresión con respecto al resto de terrenos que la rodean y dentro de ellas se observan algunas variaciones topográficas menores. Por medio de espectros y con base a la reología de los materiales se sabe que está compuesta principalmente por hielos de CH₄ y N₂ (Cruikshank et al., 2015).

Hacia el oeste de Sputnik Planitia (SP) se observa una zona transicional hacia Cthulhu Regio, una cadena montañosa que se extiende por toda esta zona izquierda, es formada por lo que parecen ser bloques aislados de unos 40 km² de área y de 2 a 3 km de altura cada uno. Se ha postulado que sean producto de una “región de caos”, donde bloques de hielo de agua flotan por densidad en una capa de hielos volátiles (G. Collins & Nimmo, 1999). La parte central de Sputnik Planitia muestra una morfología única en el sistema solar, la cual consta de un patrón celular que se repite por toda la zona, su corteza está quebrada en unas figuras poligonales que se juntan para formar mosaicos (**Figura 2-10**). La zona este de SP ya no muestra los patrones poligonales, se caracteriza por ser una planicie que tiene ciertas irregularidades en su superficie, unas estructuras llamadas “Pozos”, los cuales son agujeros redondeados que se dan por volatilización de hielos (J M Moore et al., 2015).

Espectros analizados de Cthulhu Regio muestran una abundancia de H₂O menor al 60% y con una cobertura generalizada de *tholins*, los cuales producen una reducción drástica en el albedo de la zona (Protopapa et al., 2016). El hielo de CH₄ parece variar su concentración, pero se encuentra presente en toda la región observada de Plutón; por otro lado, el N₂ se encuentra más centralizado en SP. Las señales analizadas por (Protopapa et al., 2016) indican una mezcla de CH₄ y N₂, la cual varía en proporción de norte a sur, indicando un posible proceso de movilización de N₂ dentro de Sputnik Planitia (J M Moore et al., 2015).

Figura 2-10: Sputnik Planitia. a) zona oeste con terreno montañoso, b) zona central con patrón celular, c) zona este con planicies llenas de “pozos”.



2.3.3.1 Convección gélida

En la actualidad se baraja la idea de una convección gélida bajo la superficie de Sputnik Planitia, los patrones celulares encontrados en la parte central de SP podrían ser respuestas superficiales a estos procesos de convección (Trowbridge et al., 2016). Esta morfología podría ser causada por varios fenómenos, pero el fracturamiento producto de insolación diurna y relajación nocturna en Plutón no pueden generar células tan grandes. Adicionalmente, los procesos tectónicos o puramente estructurales tendrían que actuar en grandes periodos de tiempo por la naturaleza dúctil de Sputnik Planitia, pero la reciente edad geológica de esta zona resulta un buen argumento contra esta teoría.

La convección sólida puede ser factible conociendo la reología del nitrógeno. Como indican McKinnon et al., 2016, este tiene un “power-law creep” moderado, es decir, tiene una tendencia moderada a deformarse con el esfuerzo y su viscosidad depende un poco de la temperatura. La convección ocurre si se supera una medida llamada número de Rayleigh.

Con una temperatura superficial de 36 K y una basal en profundidad de 63 K (punto de fusión del nitrógeno), la convección se daría si existe una capa de nitrógeno más gruesa que 1 km, lo cual es bastante fácil y factible (McKinnon et al., 2016). Este aumento de temperatura en profundidad debe ser alcanzado mediante algún mecanismo interno, se ha postulado que el calor interno se origina en procesos radiogénicos. Plutón tiene una densidad que apunta a cierta cantidad de roca en su interior (**Figura 2-6: Principales propiedades físicas de Plutón.**) , esta porción podría presentar un enriquecimiento en U, Th y K, que al decaer generarían calor.

2.4 Sensores remotos

2.4.1 Historia de los sensores remotos

Un sensor remoto es cualquier instrumento que captura información a distancia, sin interactuar directamente con lo que se está observando. Tuvieron que darse ciertos pasos antes de que se empezaran a usar como poderosas herramientas científicas, tal vez el punto inicial fue el invento de la fotografía y su capacidad de guardar un registro de una escena real, el cual se le atribuye al francés Joseph Niépce en 1826. Para el año 1840 la academia francesa de ciencias postuló el uso de fotografías aéreas para realizar cartografía, aunque el primer registro con éxito de este tipo de imágenes fue en 1860 por

el inglés James Wallace, desde muy temprano se entendió el potencial científico de estos instrumentos (Khorram et al., 2012).

Durante la primera guerra mundial hubo un afán por tomar fotografías militares de alta calidad desde aviones, mientras que la segunda guerra introdujo el uso de las bandas del infrarrojo y radio para recolectar información. Para esta época ya se usaban con fines científicos en diferentes áreas, más su verdadero auge llegó junto a la era espacial, momento en el cual la URSS y EE.UU desarrollaron nuevas tecnologías de sensoramiento remoto aprovechando las amplias posibilidades que daban los satélites. En las siguientes décadas se diversificaron satélites meteorológicos, de comunicaciones y observacionales, los últimos usando cámaras de alta resolución que monitoreaban la superficie terrestre, entre ellos ERST-A y ERTS-2, los cuales con el tiempo pasarían a llamarse Landsat 1 y 2.

2.4.2 Sondas espaciales

Dichas tecnologías no tardaron en ser llevadas por sondas espaciales a los planetas y satélites naturales más cercanos a la Tierra. Naturalmente, el primer cuerpo en recibir la visita de sondas espaciales fue la Luna, dada su cercanía y el afán por alcanzar el espacio en el contexto de la carrera espacial. En 1959 la sonda soviética Luna 2 fue la primera en impactar la Luna, a esta le siguieron Luna 3, 9 y 10, las cuales tomaron imágenes de buena calidad y visitaron el lado oscuro del satélite (Crawford & Joy, 2014). Estados Unidos por su parte lanzó las series “Rangers” y “Surveyor”, logrando aterrizajes controlados en la superficie lunar. Esta primera etapa entre 1959 y 1966 fueron unos años de pruebas y calibraciones, donde las tecnologías espaciales fueron mejoradas y ajustadas para una exploración más extensa. En los años posteriores la carrera espacial giró hacia la exploración tripulada, aun así, La Luna siguió siendo el objetivo de incontables misiones espaciales y en los tiempos más recientes países emergentes como China e India buscan empezar su exploración espacial en nuestro satélite natural (Wang & Liu, 2016).

Marte y Venus fueron sobrevolados exitosamente por las sondas de los programas Mariner, mostrando las primeras imágenes cercanas de la superficie de otro planeta (en el caso de Venus su atmósfera⁹; la sonda Mariner 9 fue la primera en lograr ponerse en órbita alrededor de Marte, lo que abrió paso a una exploración continua y más detallada que fue continuada por el programa Viking (Ezell & Ezell, 1984).

La carrera espacial terminó, pero las tecnologías y nuevos métodos impulsados por ella continuaron avanzando hasta nuestros días, incluyendo las sondas dedicadas a la exploración planetaria. Actualmente existe una gran variedad de sondas espaciales orbitando otros planetas: HiRISE en Marte, Juno en Júpiter, Cassini en Saturno, entre otras, todas ellas tomando información con distintos métodos, incluso usando robots automatizados como el caso de Curiosity en Marte (Arvidson, Iagnemma, Maimone, & Stein, 2017).

La exploración planetaria se hace mucho más difícil a medida que nos alejamos de nuestro planeta; Urano, Neptuno y los cuerpos más allá de ellos se encuentran tan lejos que enviar sondas planetarias se vuelve un reto por varias razones: estas naves espaciales deben tener una carga útil muy pequeña que les permita llegar tan lejos, se necesitan grandes cantidades de tiempo para llegar a estos objetivos, para maximizar la eficiencia del viaje las ventanas de lanzamiento suelen ser muy reducidas, y por último, las órbitas de llegada son tan complicadas que pequeños errores pueden hacer perder definitivamente las misiones. Todo lo anterior conlleva a que las pocas misiones que han llegado a Urano y más allá opten por sobrevuelos y no por módulos que queden en órbita, este el caso de la sonda New Horizons, la cual sobrevoló a Plutón en julio del 2015 y tomo datos de alta calidad (H. A. Weaver & Stern, 2008), (Stern et al., 2015).

Las sondas espaciales son la mejor fuente de información geológica del sistema solar excluyendo a La Tierra. Estas sondas suelen estar equipadas con cámaras de alta resolución que permiten el estudio geomorfológico de la superficie, tienen instrumentos que captan distintas partes del espectro electromagnético con las cuales es posible hallar la composición de los minerales expuestos; el mayor avance se ha logrado en Marte con los distintos rovers que lo han estudiado, los cuales están equipados con instrumentación capaz de realizar análisis químicos analíticos y todo un sistema para reconocer muestras de mano, convirtiéndose en un geólogo automatizado. Todo lo anterior hace que sea posible analizar la geología de otros planetas, o al menos lograr una aproximación al entendimiento de los procesos geológicos que allí ocurren y como han ido evolucionando a través del tiempo (Baker & Gilbert, 2014).

Aunque New Horizons tuvo contacto directo con Plutón por un periodo menor a un día, su buena planeación y lo acertado de sus instrumentos permitieron recolectar información suficiente para realizar análisis químicos, físicos y geológicos de alto nivel (H. A. Weaver & Stern, 2008).

2.4.3 New Horizons

La misión New Horizons realizó un sobrevuelo de reconocimiento a Plutón y actualmente se dirige a otros objetos menores del cinturón de Kuiper, esta hace parte del programa “New frontiers” de la NASA, que junto a las misiones Juno dirigida a Júpiter y Osiris-rex al asteroide Bennu, son las tres sondas espaciales que actualmente pertenecen a este programa y han sido desplegadas.

New Horizons es la primera misión que realizó un acercamiento tan próximo al planeta enano Plutón, tomando datos a tan solo 12.000 km de altura, y con una calidad suficiente para la realización de análisis geológicos, llegando a tener imágenes con resoluciones de 75 metros por pixel (H. A. Weaver & Stern, 2008).

Plutón ha estado siempre en la mira de los científicos planetarios como objetivo de una misión espacial, ya que para cuando empezó la era de las misiones espaciales (cerca de 1970), aún se le consideraba el último planeta del sistema solar, aunque completamente diferente a los otros gigantes gaseosos del sistema solar exterior. Pero había un gran problema, la llegada y observación a Plutón requieren mucho esfuerzo y conlleva unos gastos muy altos, lo que llevó a la postulación de distintos tipos de misiones que fueron abandonadas y vueltas a revisar durante años (H. A. Weaver & Stern, 2008).

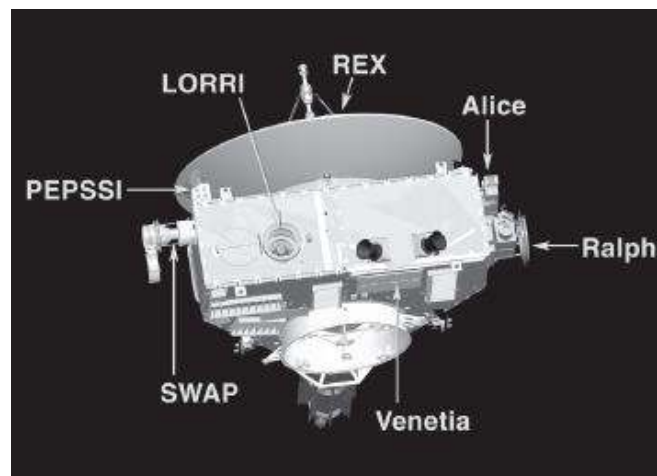
Las primeras propuestas para la exploración de Plutón se dieron en el año 1990. Para ese entonces se sabía poco de las propiedades actuales de Plutón y se postuló una misión con poco peso y un bajo potencial científico, esta no prosperó en el congreso norteamericano. Nuevas propuestas fueron hechas y descartadas durante la década de 1990, no había un acuerdo entre la NASA y el precio de la nave, lo cual hizo que para el 2000 se cancelaran todos estos proyectos (H. A. Weaver & Stern, 2008).

En el año 2001 NASA realizó una convocatoria de proyectos para misiones a Plutón y el cinturón de Kuiper, luego de solucionar problemas de financiamiento en el congreso norteamericano se presentaron cinco propuestas de las cuales fue seleccionada la hecha por Alan Stern junto con el “Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory” (APL, siglas en inglés).

La misión fue finalmente lanzada el 23 de enero del 2006, con una fecha de llegada a Plutón el 24 de julio de 2015. Durante el desarrollo de la misión se planearon encuentros con cuatro objetos; el primero de ellos fue un pequeño asteroide en el cinturón de asteroides, este encuentro tuvo como objetivo el probar los instrumentos de la nave

espacial, lo cual resulto un éxito. El segundo encuentro se dio con Júpiter, en donde se realizó una asistencia gravitacional con el planeta que redujo el tiempo de viaje en tres años. El tercer y más importante encuentro fue el paso por Plutón. Por último, se espera que New Horizons visite otros cuerpos gélidos del cinturón de Kuiper, la nave se encuentra actualmente realizando este trayecto.

Figura 2-11: New Horizons. Ubicación de los instrumentos en la sonda espacial.



Fuente: (H. A. Weaver & Stern, 2008).

2.4.4 Instrumentación

Era un reto para New Horizons lograr los mejores datos científicos con el equipo más sencillo y liviano, esto se logró sin inconvenientes y cubriendo los objetivos científicos principales de la misión. En la **Figura 2-11** se puede observar la ubicación de cada instrumento en la sonda. Cada instrumento cumplió una función específica y estos son detallados a continuación (H. A. Weaver & Stern, 2008):

-ALICE (espectrógrafo UV): Este instrumento es un espectrógrafo diseñado para captar la zona ultravioleta del espectro. Fue diseñada para estudiar la composición y temperatura de la parte superior de la atmósfera Plutónica, al igual que medir el escape atmosférico. Sus características principales son:

- Parte del espectro captado: 465 - 1880 Angstrom. Es el rango de longitudes de onda que puede captar el sensor, no obtendrá información de regiones por fuera de estos límites.

- Campo de visión: $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ y $2^\circ \times 2^\circ$. Es el área de visión del espectrógrafo, el bajo ángulo indica que cubre áreas muy pequeñas a grandes distancias.
- Resolución espacial: 5 mrad/píxel. Es la longitud más pequeña que puede captar el sensor, la cual se representa como el tamaño de los lados del píxel, la menor unidad de medida. En unidades de distancia esta media es aproximadamente 5 km/píxel.

-MVIC “Multispectral Visible Imaging Camera”: Es una cámara que toma imágenes pancromáticas y además posee unos filtros de color específicos para el azul, el rojo, el NIR (infrarrojo cercano) y un filtro especial para la detección de metano. Fue realizado con el objetivo de mapear la superficie de Plutón en diferentes partes del espectro que permitieran la identificación de los compuestos químicos presentes. Logró resoluciones de 500 metros por pixel en el pancromático y de alrededor de 5 km por pixel en los filtros de color:

- Campo de visión: 5.7° x variable.
- Resolución espacial: 500 metros/píxel en pancromático, 5 Km/píxel en los filtros.
- Filtros: 400-975nm **Pancromático**, 400-550nm **Rojo**, 540-700nm **Azul**, 780-975nm **NIR**, 860-910nm **CH₄**. Son sensores que captan partes muy específicas del espectro. En este caso los tres primeros toman regiones relacionadas al visible y el ultimo es especializado para captar metano.

-LEISA “Linear Etalon Image Spectral Array”: Este instrumento es un espectrógrafo que capta información en el infrarrojo. Su objetivo es captar diferentes picos de absorción para N₂, CH₄, H₂O, NH₃, y CO, los cuales están incluidos dentro de sus rangos de observación y permitieron su identificación; además consta con una zona de mayor resolución para identificar cambios en tamaño de grano y posibles mezclas entre los compuestos. Sus características son:

- Parte del espectro captado en baja resolución: 1250 - 2500 nm. El instrumento cuenta con dos segmentos que poseen diferentes resoluciones espectrales y cubren áreas distintas del espectro.
- Parte del espectro captado en alta resolución: 2100–2250 nm.
- Resolución espacial: 5 Km/píxel.
- Campo de visión: $0.9^\circ \times 0.9^\circ$.
- Resolución espectral: 6.5 nm/píxel; 2.7 nm/píxel. Es la diferencia entre longitudes de onda más pequeña que puede captar el sensor, en este caso el producto

muestra cambios en longitud de onda diferentes para los dos segmentos de captura.

-REX “Radio science experiment”: Este instrumento es una antena de radio ubicada en el sistema de telecomunicaciones de la nave. Su objetivo fue enviar una señal a través de Plutón con dirección a la Tierra, para de esta forma medir la densidad, temperatura y otras características de la atmósfera y subsuelo de Plutón.

-LORRI (Long Range Reconnaissance Image): Este instrumento es una cámara de alta resolución que captura datos en el pancromático. Puede tomar imágenes a variadas aperturas focales y almacenarlas a una imagen por segundo. Su objetivo es realizar las imágenes con mayor resolución superficial que permitan un análisis estereoscópico. Sus características principales son las siguientes:

- Parte del espectro captado: 350 - 850nm **Pancromático**.
- Campo de visión: 0.29° x 0.29°.
- Resolución espacial: Generalmente 500 metros por pixel, algunas imágenes alcanzan una resolución de 50 metros por pixel.

-SWAP “Solar wind around Pluto”: Este instrumento es un detector de partículas que captura iones provenientes del viento solar o de la atmósfera de Plutón, luego mide su energía para así identificarlos. Su objetivo es investigar el viento solar que interactúa con la atmósfera de Plutón y el ratio de escape de la misma.

-PEPSSI “Pluto Energetic Particle Spectrometer Science Investigation”: Al igual que SWAP es un detector de partículas de alta energía, la diferencia es que este puede definir composiciones iónicas. Su objetivo es caracterizar las partículas de alta energía de Plutón, al igual que ayudar a la identificación de la tasa de escape de la atmósfera.

-VB-SDC “Venetia Burney Student Dust Counter”: Este instrumento fue creado y dirigido por un grupo de estudiantes de la universidad de Colorado. Este recibe impactos de pequeñas partículas de polvo interestelar durante las distintas fases de la misión, con el objetivo de contar y medir densidades del polvo interestelar en diferentes partes del sistema solar.

2.5 Hielo y fisicoquímica

Comúnmente, hielo es el nombre que se le da al agua cuando se encuentra en estado sólido. Sin embargo, además del H₂O. existen otras moléculas que al existir en estado

sólido tienen una apariencia similar al hielo de agua. Por esta razón se habla de hielo seco (CH_4), hielo de nitrógeno (N_2), hielos de CO_2 , CH_4 y de otras moléculas orgánicas. Aunque en la Tierra solo abunda el hielo de agua, en varios cuerpos del sistema solar otras moléculas y compuestos se presentan en estado sólido y que bajo las condiciones terrestres solamente existen como gases (Tegler et al., 2010).

2.5.1 Tipos de hielo en el sistema solar

Son varios los cuerpos (planetas, lunas y cometas) sobre los cuales se ha detectado la presencia de hielo de agua y otras composiciones (Morbidelli & Brown, 2004). En el sistema solar interior este material se presenta principalmente en capas polares y glaciares, es decir, se encuentra aislado a lugares en la superficie donde la temperatura es suficientemente baja como para permitir la cristalización de hielo de agua (0°C). Por otro lado, en el sistema solar exterior la mayoría de cuerpos están en gran parte compuestos de hielo de agua, desde cometas hasta planetas enanos.

2.5.1.1 Sistema solar interior

Mercurio, Venus, Tierra y Marte, son agrupados en una misma categoría por estar compuestos en su mayoría por minerales silicatados y poseer núcleos metálicos (Elser, Meyer, & Moore, 2012). A excepción de Venus que prácticamente no posee agua (Kurosawa, 2015), en estos cuerpos el hielo de H_2O se encuentra limitado a las zonas donde la temperatura es lo suficientemente baja (zonas polares o altos topográficos). En la Tierra y Marte las estaciones tienen una gran influencia en la presencia de hielo y nieve, donde amplias regiones son cubiertas en invierno y destapadas en verano (Mischna, 2003).

Marte posee capas heladas compuestas principalmente por hielo de agua y dióxido de carbono, el cual se solidifica directamente de la atmósfera debido a las bajas temperaturas (-80°C) (Pilorget & Forget, 2016). Generalmente se presentan como láminas delgadas intercaladas con otros materiales, además, tienen la particularidad que varían en tamaño y forma dependiendo de la época del año. En escalas de tiempo geológicas, las capas glaciares se ven afectadas por fuertes cambios en la inclinación del eje de rotación que sufre el planeta (Mischna, 2003).

2.5.1.2 Sistema solar exterior

A diferencia del sistema solar interior, muchos astros desde Júpiter hasta la Nube de Oort contienen una inmensa cantidad de masas gélidas, la gran cantidad de volátiles presentes en esta zona se encuentran bajo temperaturas suficientemente bajas para estar en estado sólido. La mayoría de lunas de los gigantes Júpiter y Saturno están compuestas por hielo de agua en grandes cantidades (Kuskov, Kronrod, & Vernadsky, 2001). Urano y Neptuno son considerados gigantes de hielo, su estructura interna se compone en gran parte por la mezcla de hielos de distintos tipos con fragmentos de rocas silicatadas y material orgánico (Fortney & Nettelmann, 2010).

Otros cuerpos importantes de las partes más alejadas del sistema solar son los cometas, estos son fragmentos gélidos de muy variadas composiciones y tamaños que orbitan de forma desordenada por el sistema solar. Usualmente estos cuerpos se acercan al sistema solar interior en donde empiezan a derretirse y sublimarse a medida que completan sus órbitas, este proceso causa la pérdida de una gran cantidad de masa y en ciertos casos la destrucción del cometa. Sus composiciones varían entre hielo de agua, hielo seco, amoníaco, sodio, nitrógeno y otros compuestos volátiles. Como ya se mencionó, un grupo de estos cuerpos provienen del cinturón de Kuiper, por lo cual su composición gélida y estructura es representativa de los cuerpos que allí se encuentran, algo que ha sido comprobado al menos en los casos de Plutón, Eris, Haumea y otros cuantos planetas enanos (Morbidelli & Brown, 2004).

2.5.1.3 Plutón

Plutón es el objeto del cinturón de Kuiper mejor estudiado, mucho antes de la llegada de New Horizons ya se conocía bien su composición global, Cruikshank et al., 2015 realiza una compilación de estos datos, lo cual fue posteriormente complementado por lo visto en el sobrevuelo. Para la zona que se ha escogido estudiar son realmente importantes cuatro especies: N_2 , CH_4 , CO y H_2O , todos se encuentran en distintas cantidades en la superficie de Plutón y la de sus satélites y resulta interesante como en la parte central de Sputnik Planitia parecen coexistir todos ellos.

Se consideran especies volátiles al N_2 , CH_4 , CO , ya que con algunas variaciones en temperatura pueden sublimarse fácilmente. El cambio de estado puede ser alcanzado de manera sencilla por insolación debido a que Plutón permanece iluminado constantemente durante varios años, la sublimación de estos volátiles mantiene la delgada atmósfera que

posee. Plutón está entrando a su fase orbital más alejada del sol, se estima que las temperaturas bajarán tanto que la sublimación caerá progresivamente, llevando a una posible desaparición de la atmósfera (Young et al., 2018).

2.5.2 Tipos de hielo en Plutón

2.5.2.1 Hielo de H₂O

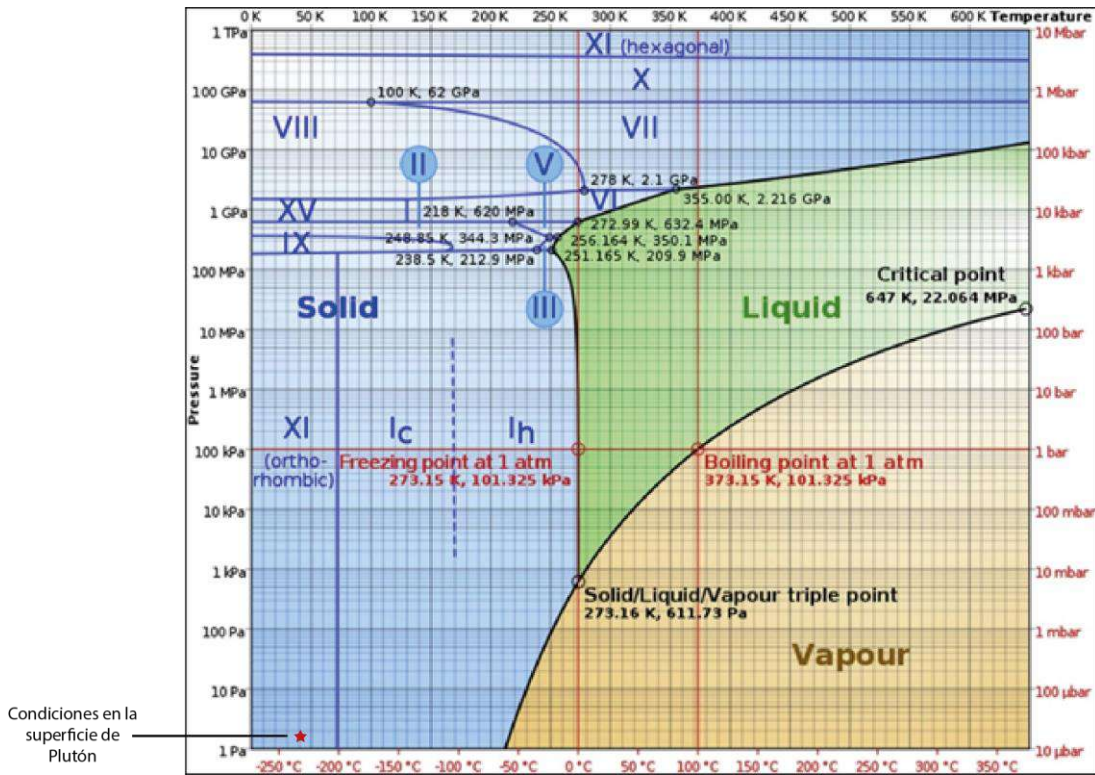
En un principio no se esperaba encontrar gran cantidad de este tipo de hielo en Plutón, pero los datos de New Horizons demostraron que abunda en ciertas partes de la superficie de Plutón (Stern et al., 2015). Con una temperatura que no supera los 40 K y una presión atmosférica de 1/100000 atm el H₂O siempre estará en estado sólido (**Figura 2-12**).

Las moléculas de H₂O se encuentran unidas por enlaces covalentes, este tipo de enlace es bastante resistente debido a que el átomo de oxígeno atrae con más fuerza a los electrones; esto también provoca que la molécula queda cargada negativamente hacia un extremo, dicha disposición le da el nombre de molécula polar. El agua presenta otros tipos de uniones, los enlaces de hidrógeno atraen unas moléculas junto a otras, y aunque esta interacción resulta más débil que los enlaces covalentes, cuando interactúan muchas moléculas su efecto es considerable. Cuando el agua se encuentra en estado líquido los enlaces de hidrógeno cobran más importancia, cada molécula se enlaza con otras cuatro, creando una fuerte estructura cristalina en el sistema hexagonal.

Esta última propiedad resulta esencial para el estudio geológico de Plutón. Los fuertes enlaces de las moléculas de H₂O hacen que los cuerpos de roca compuestos de ellas tengan una reología diferente al resto de los compuestos principales de Plutón, las estructuras compuestas de hielo de agua reaccionan de manera frágil a los esfuerzos, provocando que se expresen como geoformas resistentes (Jeffrey M. Moore et al., 2016). Esto se ve reflejado en la topografía Plutóniana, ya que contrastan fuertemente con las masas compuestas de nitrógeno y metano.

Para poder identificar la presencia de los compuestos en Plutón es necesario recurrir a sus firmas espectrales, identificando sus principales zonas de absorción. Para el caso del hielo de H₂O en estado sólido, existen tres rangos de absorción de luz característicos: 1,28-1,34 μm , 1,48-1,66 μm y 1,96-2,12 μm (Schmitt et al., 2016); los dos últimos son zonas muy amplias que deberían ser fácilmente observables.

Figura 2-12: Diagrama de fase para el H₂O. A las condiciones de Plutón siempre estará en estado sólido, cristalizando en el sistema ortorrómbico (XI).



Fuente: (Zhang et al., 2015).

2.5.2.2 Hielo de CH₄

El metano es un compuesto orgánico que se encuentra presente en varios lugares del sistema solar, en la Tierra aparece en estado gaseoso, en Titán como líquido, y en el caso Plutón en estado sólido y gaseoso. Lo anterior es posible porque las temperaturas bajas en superficie permiten su solidificación, pero debido a pequeños cambios en temperatura es también un gas en la atmósfera. El diagrama de fase para el metano se puede ver en la **Figura 2-13**. El CH₄ en estado sólido posee una densidad de 0.5 g/cm³, lo que hace que el hielo de agua no pueda flotar en él.

El metano en estado sólido se puede dar en dos fases a las condiciones superficiales de Plutón (Fase I y Fase II. **Figura 2-13**). En ambos casos cristaliza en el sistema cúbico, donde los hidrógenos en la molécula pueden rotar libremente. La principal diferencia entre ambas fases es un mayor fijamiento de los átomos en la fase II (Chitnie & Sherbrooke, 1972). Los cuerpos de roca formado por CH₄ son mecánicamente débiles, esto se debe a

que estas moléculas se juntan por enlaces de Van der Waals, los cuales son poco resistentes a la deformación (McKinnon et al., 2016), las geoformas compuestas por este material no pueden soportar topografías fuertes y estrelladas. El metano parece ser un componente importante en Sputnik Planitia, lo que correspondería con sus bajas topografías.

El hielo de CH_4 posee bandas de absorción en varias regiones del infrarrojo. Se diferencian tres grandes rangos muy característicos: 1,32-1,48 μm , 1,66-1,82 μm y 2,2-2,42 μm (Schmitt et al., 2016). Sus bandas son bien definidas y en general muy pronunciadas.

2.5.2.3 Hielo de N_2

El nitrógeno en estado gaseoso es bastante abundante en la atmósfera de la Tierra y de otros planetas y satélites (Lodders, 2008). Por otro lado, en estado sólido solo ha sido detectado en cometas, la luna Tritón de Neptuno y varios cuerpos del cinturón de Kuiper incluido Plutón. Su diagrama de fase se muestra en la **Figura 2-13**. Sus condiciones son similares a las del CH_4 y se ha comprobado que en Plutón ambos se forman en solución (Protopapa et al., 2016). Tiene una densidad de 1 g/cm^3 lo que permite que el hielo de agua puede flotar en él, este fenómeno parece ocurrir por toda Sputnik Planitia, lo que apuntaría a que el contenido de N_2 en esta región podría ser bastante grande.

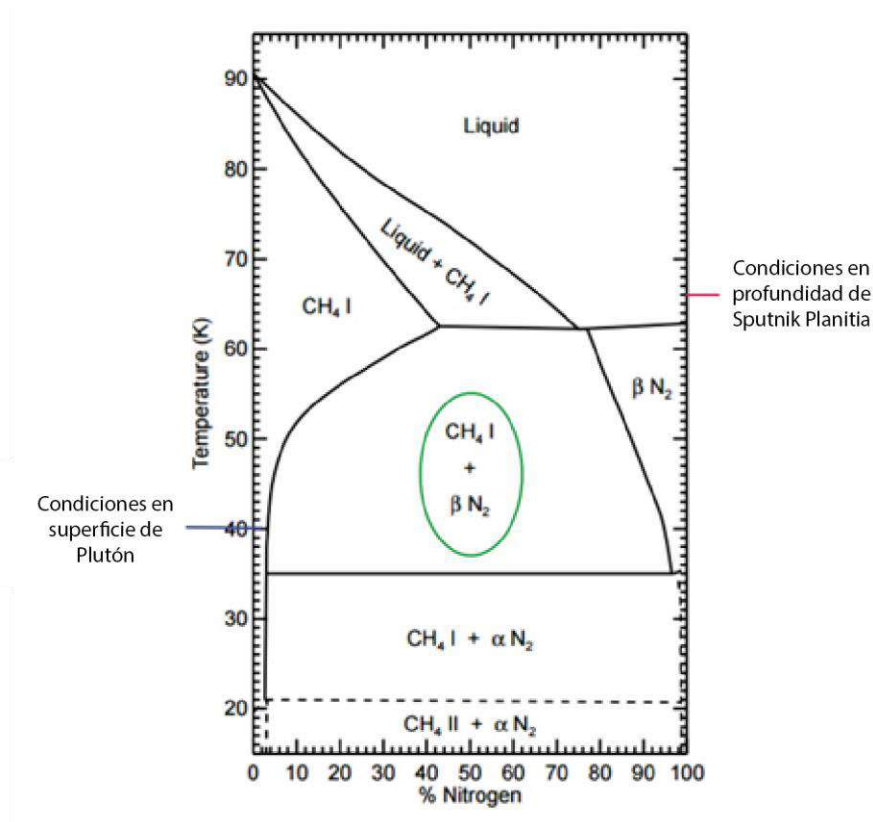
El N_2 en estado sólido puede cristalizar en varias fases distintas, pero para el caso de Plutón puede estar presentes en dos de sus fases: β y α . La primera de ellas es la de alta temperatura (45 K o más) y cristaliza en el sistema hexagonal, mientras que la fase α es de baja temperatura (menos de 45 K) y cristaliza en el sistema cúbico (Fray & Schmitt, 2009). Dado que se ha postulado una posible convección en el interior de Sputnik Planitia (Trowbridge et al., 2016), es factible que a profundidad se de la variante de alta temperatura β .

La reología del N_2 es similar a la del CH_4 , los sólidos que forma se unen por enlaces de Van der Waals, lo que los hace mecánicamente débiles. Esta poca resistencia hace que se deforme de manera dúctil a los esfuerzos, lo que sumado a que su viscosidad depende ligeramente de la temperatura, daría paso a la convección bajo Sputnik Planitia.

Los hielos de N_2 presentan un único pico característico en 2,15 nanómetros (Schmitt et al., 2016), este es bastante débil y puede quedar cubierto por otras señales cuando la cantidad de N_2 es demasiado baja. Sólo cuando la concentración de N_2 es muy alta es posible

identificar de manera ligera la presencia de este compuesto, de modo que se debe ser cuidadoso al identificarlo.

Figura 2-13: Diagramas de fase para el CH_4 y N_2 . A la temperatura superficial de Plutón (36-40K) ambos estarán presentes en estado sólido, pudiendo llegar a sublimarse. Dependiendo de la temperatura el CH_4 puede tener dos formas cristalinas (I y II: Sistema cúbico). El N_2 también podrá cristalizar de dos maneras β : Sistema hexagonal, α : Sistema cúbico). La mezcla esperada en superficie se muestra dentro del ovalo verde.



Fuente: Modificado de (Tegler et al., 2010).

2.5.2.4 Hielo de CO

El monóxido de carbono es abundante en estado gaseoso en varios planetas del sistema solar, en donde actúa como un gas invernadero, en Plutón se presenta en estado sólido, pero en menor concentración que el N_2 y el CH_4 . Posee una densidad similar a la del nitrógeno, por lo cual bloques de hielo de agua podrían flotar en una matriz de monóxido de carbono (Muller, 1992).

El CO puede presentarse en dos fases sólidas en las condiciones de Plutón. La fase β de alta temperatura (60 K) podría estar presente en las profundidades de Sputnik Planitia, mientras que la fase α es la que se encuentra estable en la superficie de Plutón.

Junto al N_2 y el CH_4 , estos tres compuestos suelen combinarse en una solución sólida a las temperaturas ambiente de Plutón. Esta mezcla se puede presentar en dos variantes: una fase rica en CH_4 con pequeñas cantidades de N_2 y CO ($CH_4:N_2:CO$), y una fase rica en N_2 con cantidades de cerca de 0.5% de CH_4 y CO ($N_2:CH_4:CO$), (Schmitt et al., 2016).

Lamentablemente, las bandas de absorción del CO son muy débiles y pueden ser fácilmente cubiertas por las señales de los otros tres compuestos mayores, dificultando enormemente su detección con la resolución y rangos utilizados por LEISA (H. A. Weaver & Stern, 2008).

3. Manejo y corrección de datos

Los datos que permiten el estudio de otros planetas y objetos del sistema solar varían según el cuerpo que se desee estudiar. Los meteoros que llegan a la Tierra y se conservan hasta llegar a la superficie proveen la única evidencia directa de un cuerpo celeste al igual que las muestras lunares traídas en las misiones Apollo de NASA y el programa soviético Luna (Crawford & Joy, 2014). Pero para objetos puntuales y tan alejados como Plutón y sus satélites solo se puede contar con información de telescopios y sondas espaciales (Baker & Gilbert, 2014).

Plutón ha sido observado por medio de telescopios desde hace varias décadas. La **Figura 2-7** muestra uno de los resultados más completos que se pueden obtener por este medio. Como ya se ha mencionado, para llegar a hacer análisis geológicos detallados es necesario tener datos de sondas espaciales, este criterio se cumplió con la sonda New Horizons.

La misión New Horizons, al ser manejada por NASA está sujeta a una política general de manejo de datos, todos los productos científicos de la misión deben ser liberados al público general, desde la información en bruto hasta los productos de alta calidad como mapas o imágenes corregidas. La distribución de esta información se realiza con base a fechas preestablecidas que tiene en cuenta la llegada de los datos y el tiempo de tratamiento interno llevado a cabo por el personal de la misión. Los datos son subidos paulatinamente a la base de datos virtual PDS (Planetary Data System), la cual es administrada por la NASA y es el repositorio oficial de todos sus datos científicos relacionados a las ciencias planetarias (JPL, 2008).

Los productos de New Horizons actualmente se encuentran subidos al PDS en su totalidad. Estos datos presentan correcciones instrumentales básicas y de espacio profundo, se pueden encontrar unas versiones de menor procesamiento las cuales son llamadas RAW. Para este trabajo se usarán los datos con mayor procesamiento base, los cuales están catalogados como 2.0.

3.1 Descarga y visualización

Todos los datos relacionados a Plutón se encuentran en el nodo “Small bodies” del PDS, están organizados por fase de misión, instrumento y nivel de procesamiento de los datos. En este caso se usaron solamente los datos de la fase “Pluto encounter”, dentro de la cual se descargaron los datos de LEISA, MVIC y LORRI en sus versiones 2.0.

Figura 3-1: Carpetas contenidas en un paquete de datos del PDS. En este caso el paquete contiene productos del instrumento MVIC en su versión 2.0.

Index of /holdings/nh-p-mvic-3-pluto-v2.0			
Name	Last modified	Size	Description
Parent Directory		-	
calib/	08-Nov-2016 07:39	-	
catalog/	08-Nov-2016 07:39	-	
data/	08-Nov-2016 07:39	-	
document/	08-Nov-2016 07:59	-	
DOWNLOAD/	09-Nov-2016 15:48	-	
index/	08-Nov-2016 07:39	-	
NOTES/	09-Dec-2016 14:56	-	
aacadac.txt	08-Nov-2016 07:39	16K	
dataset.html	09-Dec-2016 14:57	4.3K	
voldecr.txt	08-Nov-2016 07:39	5.5K	[PDS catalog file]

El archivo descargado se compone de una carpeta en formato Zip que contiene dentro de sí los ítems mostrados en la **Figura 3-1**. La información científica como tal se encuentra en la carpeta “data”; las carpetas “index” y “catalog” contienen información complementaria que organiza y caracteriza los datos. Los demás elementos cuentan con instrucciones para entender este paquete y otra información acerca del instrumento del que hacen parte los datos.

El material de mayor valor científico en esta carpeta está contenido en “data”, las imágenes captadas por todos los instrumentos vienen distribuidas en carpetas más pequeñas que corresponden a una secuencia de toma de datos del instrumento, donde cada una de estas secuencias corresponde a un objetivo científico y una sesión de captura de datos. Las carpetas son nombradas como en la **Figura 3-2**. El ejemplo escogido muestra datos en el

día del sobrevuelo (14 de julio de 2015). De entre toda la información de cada instrumento, solo se usaron los datos correspondientes a esta fecha.

Figura 3-2: Nomenclatura de los paquetes de datos. AA: Año, M: Mes, D: Día correspondientes a la fecha de toma; al final aparece un código identificador de cada secuencia.



Los datos poseen formato FITS (Flexible Image Transport System), y están acompañados por un archivo ASCII conocido como “Header”. El formato FITS es ampliamente usado en astronomía por su capacidad de almacenar varias capas de información de forma sencilla. Cada archivo contiene de entre una a seis tablas numéricas de tamaños según el instrumento, la primera de ellas contiene los digital numbers (DN) de la observación, mientras que las demás tienen información de las correcciones básicas que se le aplican a los datos (flatfield, bias). La estructura básica se muestra en la **Figura 3-3**. El archivo “Header” contiene la descripción del archivo FITS, incluyendo el objetivo, hora, altura, posición solar y efemérides de la sonda al momento de la captura.

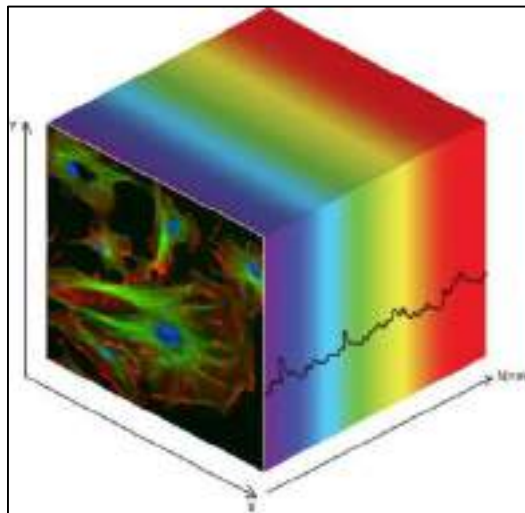
Figura 3-3: Estructura interna de un archivo FITS. Cada fila corresponde a una tabla de datos. La fila 0 contiene los datos científicos y las demás son tablas de calibración y correcciones usadas sobre los datos principales, el ejemplo muestra un cubo de datos del instrumento LEISA.

Filename: lsb_0299175509_0x53c_sci.fit					
No.	Name	Type	Cards	Dimensions	Format
0	PRIMARY	PrimaryHDU	240	(256, 256, 995)	float32
1		ImageHDU	7	(256, 256, 2)	float32
2		ImageHDU	7	(256, 256, 3)	float64
3		ImageHDU	6	(256, 256)	float32
4		ImageHDU	7	(256, 256, 2)	float32
5		ImageHDU	7	(256, 256, 995)	float32
6		ImageHDU	7	(256, 256, 995)	int16
7		ImageHDU	6	(5, 995)	float64
8		ImageHDU	6	(115, 675)	uint8

Los datos del instrumento LEISA resultaron ser un caso especial, ya que estos se presentaban en forma de cubos espectrales. Los cubos son tablas consecutivas que muestran una misma área, pero que en la tercera dimensión varía en longitud de onda.

Este último paso es logrado con múltiples capturas. Con estos datos se reconstruyeron las firmas espectrales de la zona de estudio. La estructura de un cubo espectral se muestra en la **Figura 3-4**.

Figura 3-4: Estructura de un cubo espectral. Las dimensiones X y Y corresponden al campo de captura del instrumento (área), la dimensión Z es una variación en longitud de onda de esa misma área.



Fuente: (Photon.etc, n.d.).

El modelo digital de elevación (DEM, siglas en inglés) fue descargado de la página del servicio geológico de los Estados Unidos (USGS, siglas en inglés). Este cuenta con una resolución de 300 metros por pixel y fue obtenido por medio de fotoclinometría; abarca el hemisferio de Plutón observada por la sonda. Se decidió utilizar la versión de los datos el formato TIF, debido a su versatilidad para ser usado en varios softwares SIG y de análisis de imágenes.

3.2 Transformación de los datos

El formato FITS, aunque ideal para el almacenamiento de datos, no es fácil de procesar con los sistemas de información geográficos convencionales, ya que no reconocen este tipo de formato. Se realizó una observación preliminar con un software astronómico, en donde se corroboró la integridad de la información científica. Posteriormente se realizó una depuración y organización de los paquetes que contenían información relevante en cuanto

a la geología de Plutón, al igual que se separaron aquellos datos que tenían como objetivo a Caronte y los otros satélites naturales.

Los datos fueron cambiados a dos formatos distintos teniendo en cuenta los objetivos a cumplir y las características iniciales de cada paquete. El primer grupo son aquellos provenientes de los instrumentos MVIC Y LORRI. Estos FITS son imágenes sencillas que muestran un área en la superficie, en el caso de MVIC son imágenes multiespectrales con el objetivo de estudiar composiciones. Por otro lado, los datos pancromáticos de LORRI tenían dos finalidades: mostrar en alta resolución el área escogida y ser un suplemento para los modelos en tres dimensiones de la zona de estudio. En ambos casos los datos fueron transformados a formato TIFF usando en software DS9, este nuevo formato es reconocible por sistemas de información geográfica como ArcGIS y ENVI, en los cuales se realizó el análisis geomorfológico y morfométrico. Las imágenes de bandas compuestas fueron reconstruidas por este medio tomando los datos de MVIC.

El segundo grupo de datos son aquellos correspondientes al instrumento LEISA, cuyos cubos espectrales tienen una estructura más compleja que un FITS normal. En este caso se pasaron los datos a formato ASCII, el cual permite una reorganización de datos sencilla. Para la transformación de los datos se usó el lenguaje de programación Python; los datos fueron leídos y cargados, luego se seleccionaron las tablas con los datos útiles y fueron reescritas en un formato más manejable. El código utilizado se muestra en la **Figura 3-5**. Terminado este proceso los datos estuvieron listos para su procesamiento.

Figura 3-5: Código utilizado para transformar el formato de los cubos de datos. Realizado en Python.

```
import numpy as np
import pyfits as fit
data = fit.open('lsb_0299175509_0x53c_sci.fits') #"Datos en formato FITS"

datacube=data[0].data #"Se aislan los datos del cubo"

for i in range(datacube.shape[0]): #"El código que transforma los datos en CSV"
    with open('leisa1{}.csv'.format(i), "wb") as outfile:
        np.savetxt(outfile,i,fmt='%.5f',delimiter=' ')
```

3.3 Procesamiento datos de LORRI

Los datos de LORRI fueron utilizados para los análisis geológicos y geomorfológicos de la zona de estudio, para esto fue necesario realizar una serie de pasos de calibración y ajuste a los datos originales. Ya que los datos se transformaron al formato TIF, el resto de su procesamiento fue realizado en el sistema de información geográfica (SIG) ArcGIS.

3.3.1 Mosaicos

Los datos de LORRI son imágenes pancromáticas, todas ellas con dimensiones de 1024x1024 píxeles. El paquete usado contiene en total 85 imágenes, siete de estas imágenes fueron descartadas por estar dañadas o no contener información relevante. Las imágenes fueron divididas en tres grupos de datos, diferenciados entre sí por su resolución espacial. Estos cambios en la resolución de las imágenes es el resultado de distintos barridos del instrumento LORRI sobre la superficie de Plutón, todos centrados en la zona de Sputnik Planitia. Como cada uno de los tres grupos congregan imágenes tomadas en un mismo barrido, todas ellas son consecutivas espacialmente. La sonda fue programada para no dejar vacíos durante su recorrido, por lo cual fue posible juntar todas las imágenes de cada grupo de manera coherente.

El proceso de generación de mosaicos fue realizado en ArcGIS por medio de la herramienta de georeferenciación. Este primer paso se realizó sin haber asignado coordenadas geográficas a las imágenes. Se utilizaron entre 20 y 80 puntos de control para el solape de cada imagen, siendo mayor el número de puntos en las imágenes de mejor resolución. Los tres grupos de imágenes son descritos a continuación:

- **Low Definition (LD):** Conjunto de imágenes con la menor resolución (500 m/píxel). Consta de 12 imágenes que abarcan aproximadamente toda el área de Sputnik Planitia. Poco solapamiento entre imágenes (**Figura 3-6**).
- **Medium Definition (MD):** Conjunto de imágenes con una resolución media (150-250 m/píxel), consta de 12 imágenes que muestran el borde izquierdo de Sputnik Planitia, resaltando la extensa cordillera que allí se presenta. Poco solapamiento entre imágenes (**Figura 3-7**).
- **High Definition (HD):** Conjunto de imágenes de muy alta resolución (± 50 m/píxel). Consta de 54 imágenes que cubren una franja en sentido NW/SE de Sputnik

Planitia, desde su extremo norte al sur. Alto solapamiento entre imágenes (**Figura 2-8, figura 3-9**).

3.3.2 Modulación de color

Cuando los mosaicos fueron armados se evidenció un problema con el tono general de la imagen resultante, algunas imágenes dentro de los mosaicos tenían una tonalidad de color distinta, provocando discontinuidades de color en la imagen final. Estas diferencias entre los datos es producto del método de captura de New Horizons, ya que cada imagen es tomada mientras la sonda se encuentra en movimiento, generando que la iluminación cambie cada cierta cantidad de imágenes y dando como resultado disimilitudes en las escenas capturadas (H. Weaver & Taylor, 2016).

Este efecto fue corregido con dos métodos distintos: por medio de operaciones matemáticas para los grupos LD Y MD, y realizando un proceso de ortorectificación en el grupo HD.

El primer método consistió en una modulación de la intensidad de las imágenes por medio de la herramienta calculadora raster de ArcGIS. El procedimiento se aplicó a cada una de las imágenes hasta que se consiguió una homogeneidad en los mosaicos. En el grupo LD se le aplicó a 3 imágenes en total, mientras que al grupo de MD solo fue necesario en una imagen. Este método fue preferido para los grupos LD y MD por su baja resolución y gran área de cubrimiento, haciendo este proceso más efectivo.

Los mosaicos de alta definición mostraron una variación en color mucho mayor que los otros dos, cada una de las imágenes tenía una tonalidad distinta complicando la visualización de los datos. Como el paquete constaba de 54 imágenes repartidas en dos fajas de datos, resultaba muy laborioso ajustar cada imagen por medio de la calculadora raster, por esta razón se decidió realizar un ajuste preliminar de las tonalidades con el software Photoshop.

Una vez todos los grupos de imágenes presentaron una consistencia en sus paletas de color se prosiguió a generar una sola imagen en formato TIF para los grupos LD y MD, facilitando así el posterior proceso de georreferenciación. Se comprobó que esta modulación no tuviera un mayor efecto en la iluminación de las geoformas, para así evitar posibles errores en la interpretación.

Figura 3-6: Mosaico de baja definición (LD). a) Las doce imágenes del mosaico unas junto a otras, b) El mosaico de LD luego de ser modulado en color y ortorectificado.

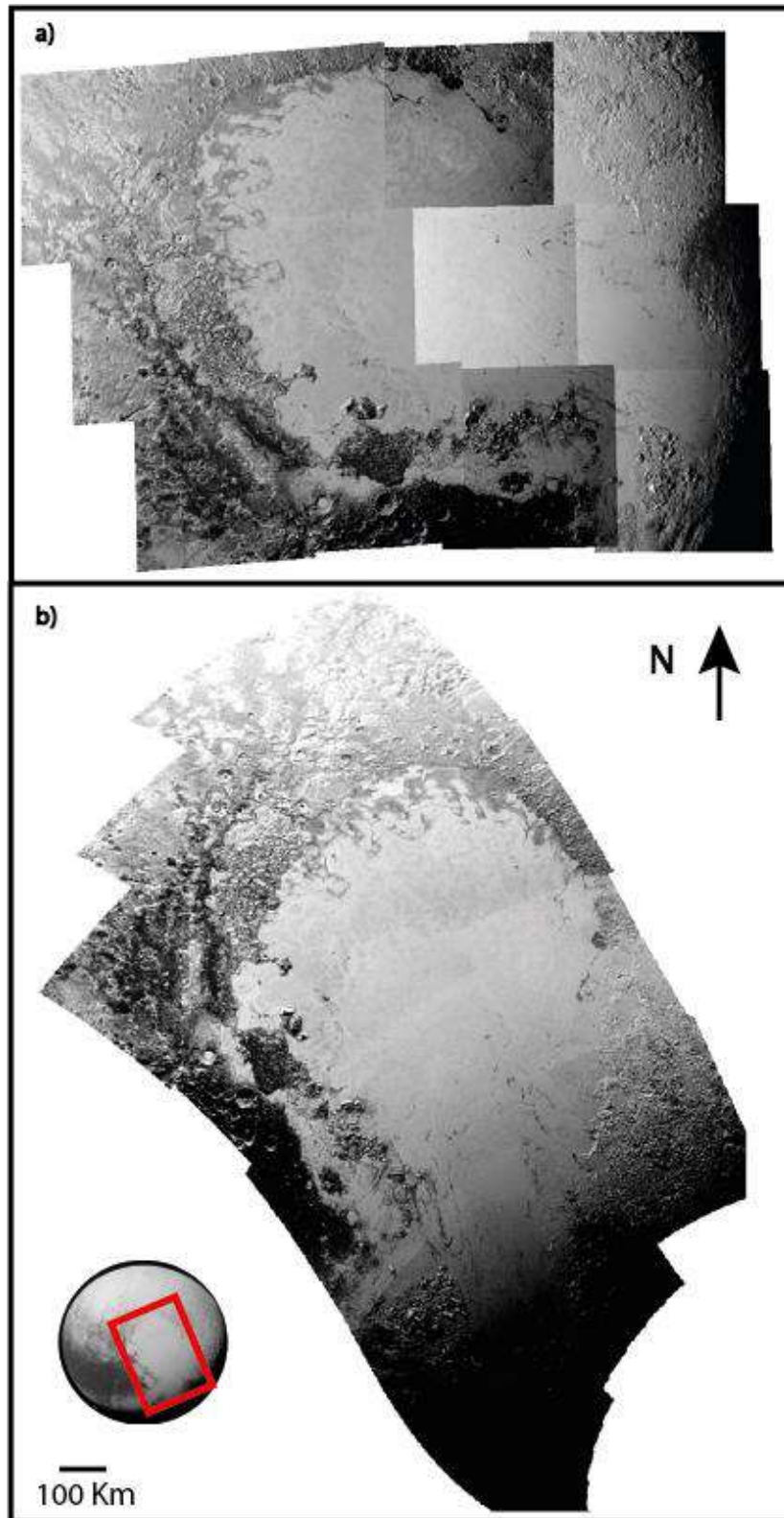


Figura 3-7: Mosaico de definición intermedia (MD). a) Las doce imágenes del mosaico unas junto a otras, b) El mosaico de MD luego de ser modulado en color y ortorectificado. La deformación hacia los extremos es muy grande por el tamaño del área de captura de y la trayectoria oblicua de la toma con respecto al norte de Plutón.

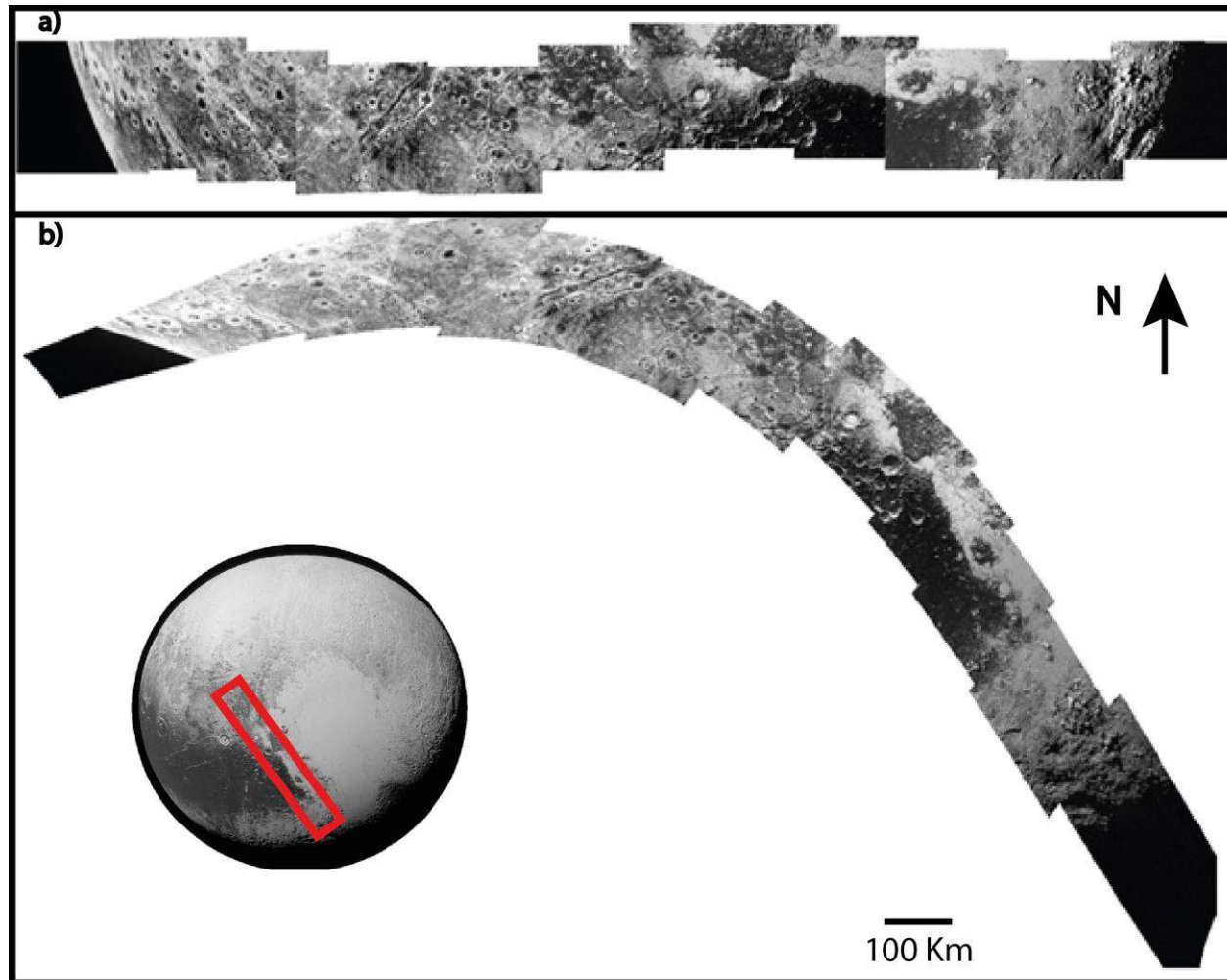


Figura 3-8: Mosaicos de alta definición (HD). Sin corrección de color ni georreferenciación.

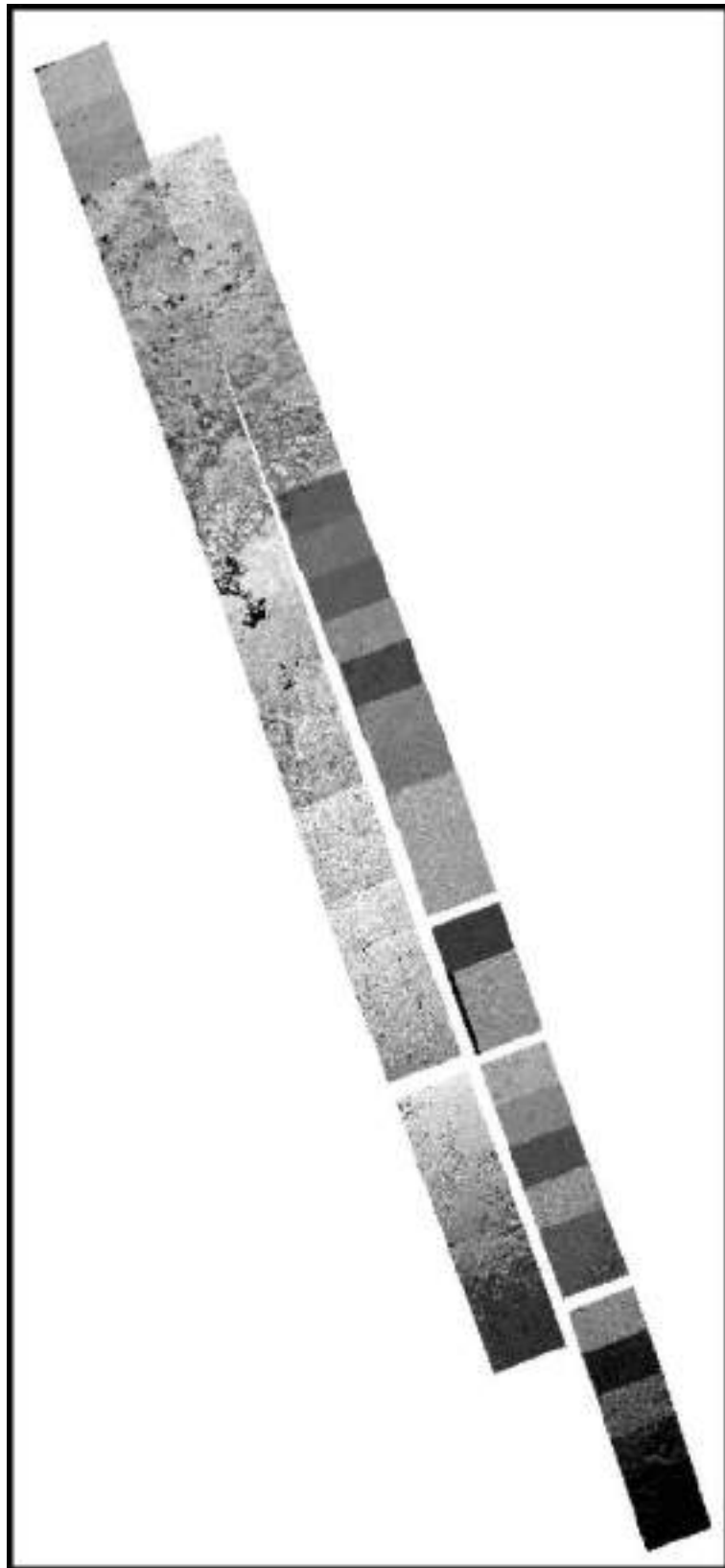


Figura 3-9: Mosaico de alta definición (HD) corregido. Mosaico después de realizar la modulación de color y la georreferenciación. Se aplicó el proceso de corrección únicamente a la faja izquierda de la figura HD. Se escogió esta secuencia de imágenes por su variedad geológica, especialmente por las características que se distinguen de la cadena montañosa Hillary montes.

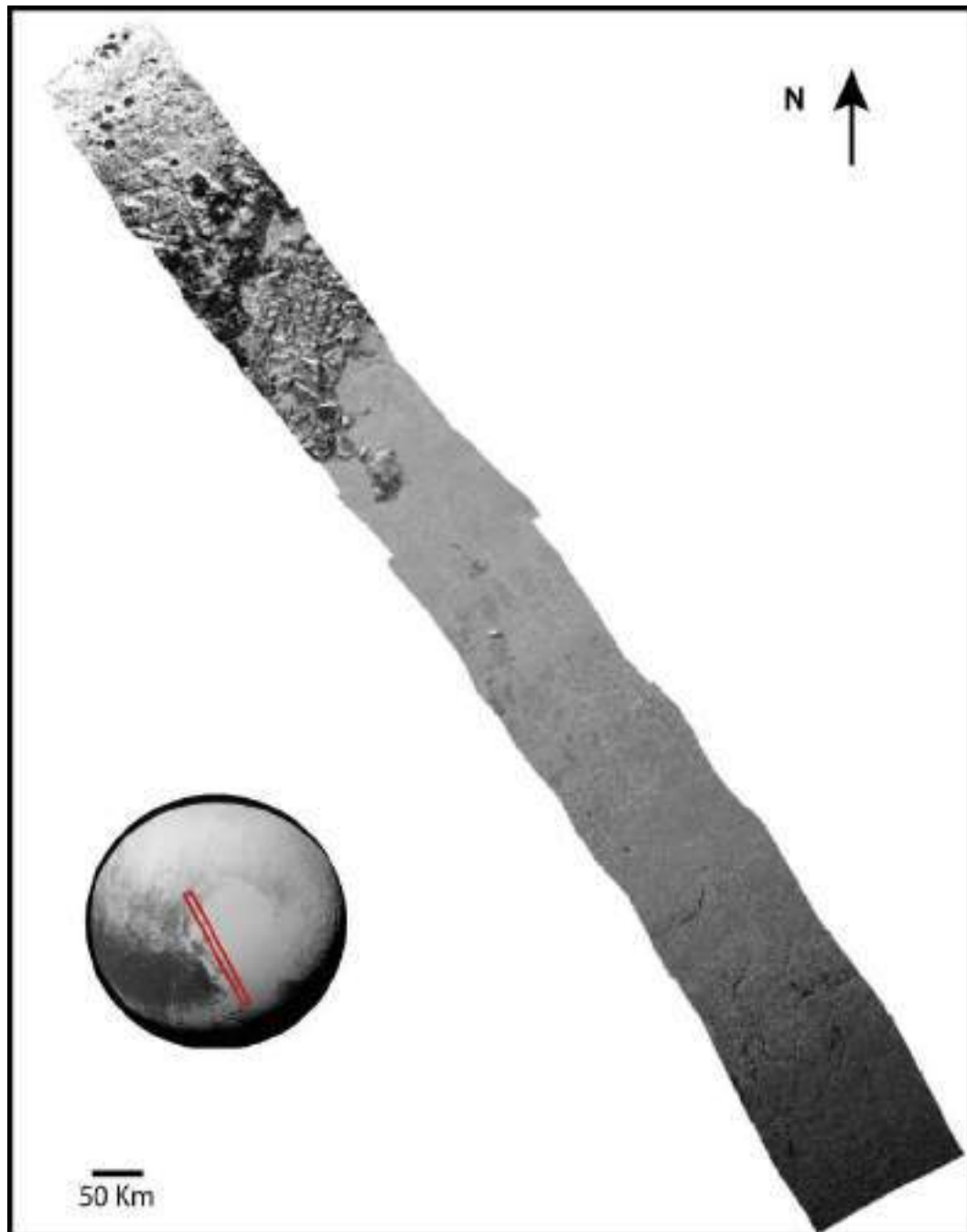
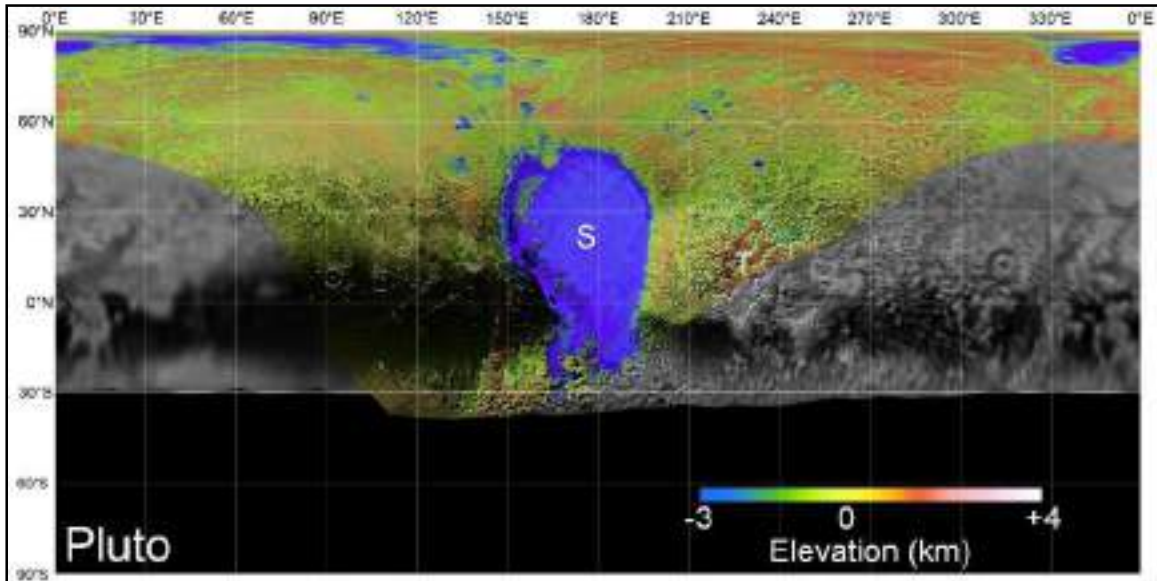


Figura 3-10: Mapa base de Plutón con las coordenadas geográficas correspondientes. La deformación es mínima en la zona de Sputnik Planitia, permitiendo una mejor visualización de esta zona.



Fuente: (USGS, n.d.).

3.3.2 Sistema de coordenadas

Para poder realizar un análisis de la superficie de Plutón, fiel a sus características reales, fue necesario trabajar en un sistema de coordenadas acorde al planeta enano. Esto permitió tomar medidas a escala real y recrear de manera certera sus geoformas. Con este fin se utilizó como sistema de coordenadas a “PLUTO 2000”, el cual viene por defecto en el software ArcGIS y está calibrado de manera precisa con el geoide de Plutón.

Una vez el sistema estuvo configurado, se utilizó un mapa cartográfico base de Plutón como guía para el resto de capas (**Figura 3-10**). Para facilitar la visualización de todos los objetos se decidió colocar el meridiano 180° del mapa base en el correspondiente a 0° en el sistema de coordenadas, esto no afectó la distancia o las dimensiones de los demás productos. El siguiente paso consistió en agregar el DEM global, el cual por tener las mismas dimensiones del mapa base, bastó con superponerlo para que quedara ubicado correctamente en el visor de datos. Se corroboró la correcta proyección de los datos midiendo el tamaño de varios píxeles en el DEM, en ninguno de ellos se presentó una deformación mayor a 20m en la zona de estudio.

3.4 Corrección del Modelo digital de elevación

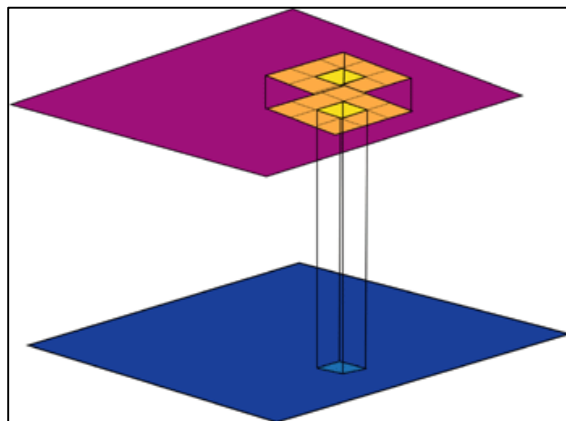
El DEM global utilizado para este trabajo fue corregido por varias razones. Aunque gracias a su método de obtención el área de cobertura es bastante grande, también se generaron algunas falencias en cuanto a la calidad de los datos, como una abundante presencia de ruido.

El primer problema que se observó con el DEM es la distorsión en los valores de altitud hacia los extremos norte y sur del modelo. Este efecto se generó por los cambios en iluminación solar a través de las imágenes de las cuales se procesó el DEM. Observando los valores de altitud en él, se encontró que la parte más norte se muestra con valores altos y bastante homogéneos, mientras que en el extremo sur las variaciones de altura son entre valores muy disímiles que se repiten constantemente. Esta distribución de la distorsión indica que la iluminación solar provenía de arriba, dando una mayor irradiación en la parte norte de Plutón. Esta saturación eliminó las sombras generadas por el relieve y dio paso a los anómalos valores de altitud observados en estas latitudes; lo contrario ocurrió en la parte más sur del modelo, el ángulo muy agudo de iluminación resaltó las sombras, provocando que en el proceso de fotoclinometría se exageraran los quiebres topográficos. El segundo problema eran las distorsiones hacia los extremos del DEM producto de la curvatura del planeta enano no fueron corregidas para esta versión de los datos. Afortunadamente, la zona de Sputnik Planitia fue enfocada de manera intencional en la parte central del modelo digital, de manera que la distorsión fuera mínima en el área de mayor interés. Cierta grado de distorsión es evidente en la parte más sur de Sputnik Planitia, lo cual fue tenido en cuenta al momento de realizar los análisis morfológicos.

El DEM utilizado presentaba ciertas deficiencias en cuanto a la resolución de los datos, especialmente en la zona de Sputnik Planitia. La tendencia general en la topografía de la zona estaba bien representada, pero al enfocar algunos sectores específicos se detectaron unos valores anómalos con cambios abruptos en los valores de elevación, como una especie de ruido de fondo. Este ruido podría estar asociado a pequeños cambios en la coloración y algunas rugosidades en la superficie de Sputnik Planitia, al ser esta una región generalmente plana, pequeños cambios en textura y coloración fueron tomados erróneamente como sombras de topografías en el proceso de fotoclinometría, dando paso a estos cambios incoherentes de pendiente.

Se realizaron varias rutinas de corrección y suavizado para el DEM, en busca de mejorar la calidad de los datos y eliminar el ruido superpuesto. La primera de ellas fue la realización de una operación de vecindad, este método genera una ponderación entre cada pixel con los pixeles adyacentes a el mismo (**Figura 3-11**), generando un suavizado de valores anómalos en el raster. Este procedimiento es bastante útil al trabajar con datos de elevación, debido a que estos valores siempre presentan una continuidad, es posible eliminar o mitigar errores instrumentales al hacer un promedio de cada valor con los pixeles circundantes. Para este DEM se utilizó una ventana focal rectangular de 6 x 6 pixeles y se aplicó una operación de promedio para cada pixel en el raster; este proceso fue ejecutado con la herramienta estadísticas focalizadas de ArcGIS[®].

Figura 3-11: Modelo esquemático de una operación de vecindad con una ventana rectangular. El valor de salida es un ponderado entre el original con sus valores circundantes.



Fuente: (ESRI, 2017).

El segundo proceso de corrección que se realizó fue una función de relleno. Este procedimiento permite la eliminación de picos y caídas en los valores de los datos. Cuando un determinado pixel muestra valores extrañamente bajos o altos con respecto a los pixeles circundantes, es rellenado o cortado hasta un valor que sea concordante con sus vecinos inmediatos. Este proceso cumple una función complementaria a las operaciones de vecindad, solo que en este caso se remueven directamente aquellos datos con valores extremos.

Sputnik Planitia tuvo un procesamiento especial, se encontró que el modelo de elevación presentaba una gran cantidad de ruido en la zona de la planicie, mucho mayor que en el

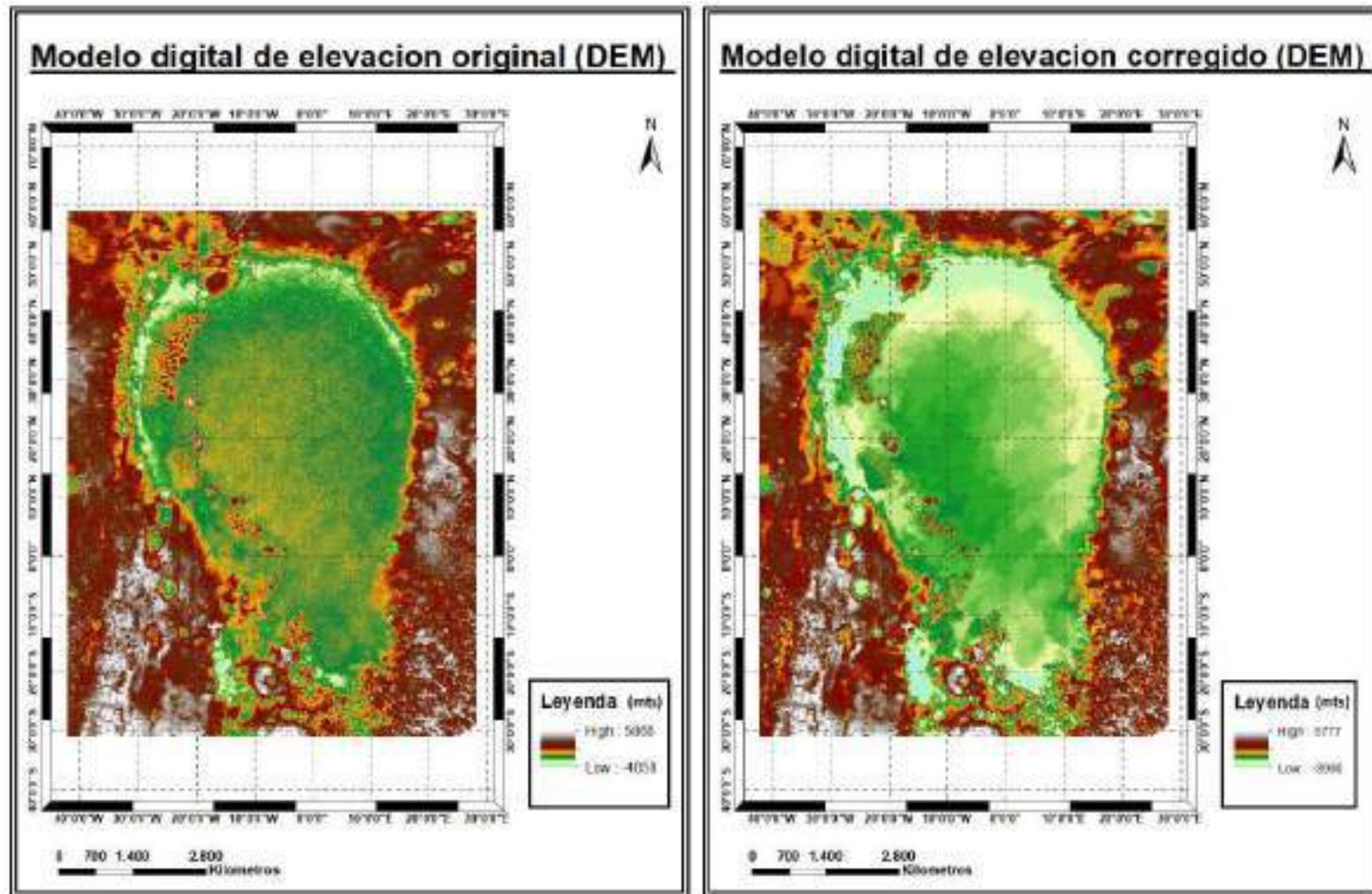
resto de la zona. Aun así, fue posible identificar información valiosa aún con el intenso ruido, por lo cual se decidió realizar un proceso de suavizado extra a esta región del DEM. El primer paso consistió en crear un nuevo raster en la zona que necesitaba el mayor suavizado, a esta nueva capa se le realizó un proceso de “Resta”, en el cual la topografía es invertida con respecto a sus valores originales. El ruido era tan fuerte que el DEM tenía muchos picos anómalos, y como la función relleno solo remueve huecos, fue necesaria la creación de la capa inversa, de esta manera se eliminaron los huecos en el modelo, que en el DEM original equivalían a los picos anómalos. El siguiente paso fue devolver los datos a su estado original, se aplicó nuevamente la función resta al raster alterado. Al acabar este proceso se observó que la mayoría del ruido había sido eliminado y la información importante se conservó lo suficiente para realizar interpretaciones. Por último, se prosiguió a pegar la zona de la planicie ya corregida con los datos del resto de la zona, y se aplicó una nueva función de filtro al resultado de esta unión. De esta manera se obtuvo el DEM corregido, el cual puede observarse en la **Figura 3-12**.

3.5 Georreferenciación

Una vez colocados los datos base de Plutón, el siguiente paso consistió en la ubicación de las imágenes de LORRI a su posición real. Para facilitar la visualización de los datos, se realizó un corte al DEM global, de modo que solo fuera observable la región de Sputnik Planitia y sus alrededores. También se cambió su simbología para un mejor despliegue (**Figura 3-12**).

Las imágenes fueron georreferenciadas por grupos. El grupo LD fue el primero en ser ajustado al sistema de coordenadas, para ello se utilizó el DEM cortado y ya referenciado como guía. Se buscó en el mosaico LD las geoformas más representativas para ser luego identificadas en el DEM, siguiendo este principio, los primeros puntos de agarre fueron colocados en el margen norte de Sputnik Planitia, al igual que en los cráteres que lo rodean. Después, los márgenes izquierdo y derecho del grupo fueron referenciados, usando la gran cadena montañosa en el primero y los bordes difusos de Sputnik Planitia en el segundo. En total se crearon 99 puntos de control al referenciar el mosaico LD, la transformación se realizó con un polinomio de tercer orden (**Figura 3-6**).

Figura 3-12: Modelo digital de elevación (DEM). A la izquierda modelo digital de elevación original (DEM) a 300 m/pixel, en la zona de Sputnik Plateau, la simbología resalta las zonas altas en blanco y las bajas en verde claro. A la derecha modelo digital de elevación corregido, los valores de altura se ven levemente afectados.



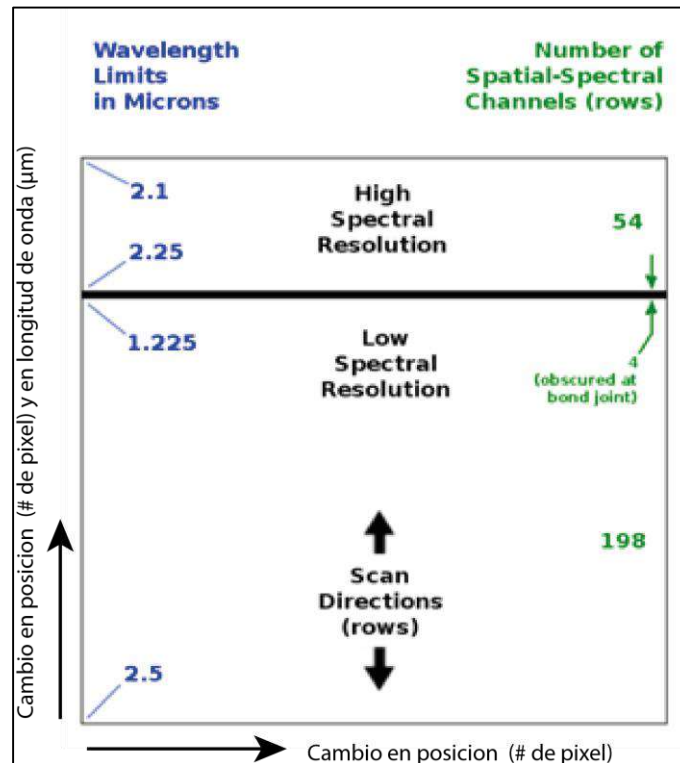
El segundo grupo referenciado fue el mosaico MD, para este se utilizó como guía la parte izquierda del mosaico LD referenciado y el DEM cortado en la zona más occidental, donde no había solapamiento con LD. Para este caso se utilizó la cadena montañosa como geoforma de referencia, seguido de los cráteres en la parte más occidental de Sputnik Planitia y comienzos de Cthulhu Regio. Estas geoformas fueron seleccionadas para el ajuste por el alto contraste de forma y textura que muestran con otras regiones, esto permitió identificar de forma clara y concisa los mejores puntos de agarre. En total se utilizaron 47 puntos de control, menor al caso anterior por ser el área de cobertura mucho más reducida; la transformación se realizó con un polinomio de tercer orden (**Figura 3-7**).

Los dos mosaicos de alta definición volvieron a representar un reto para esta etapa del procesamiento. La gran cantidad de imágenes existentes y la alta resolución exigían una gran cantidad de puntos de control antes de lograr a una buena georreferenciación. Por esta razón se decidió ortorrectificar únicamente una de las dos fajas de imágenes, aquella que presentaba los rasgos geológicos más interesantes y la mayor variación en cuanto a las formas del terreno. Cada imagen fue referenciada por separado con entre 200 a 300 puntos de anclaje para en cada una, con la sumatoria de ellas se generó una faja continua que se extiende de noroeste a sureste, que atraviesa a Sputnik Planitia casi en su totalidad. Por último, se realizó un paso de pos-procesado con el método spline, el cual optimiza el proceso de despliegue de los datos (**Figura 3-9**).

3.6 Procesamiento datos de LEISA

Los datos de LEISA presentaban una complicación adicional además de su formato. El método de captura de datos generó un corrimiento espacial y espectral dentro del propio cubo, necesitando una corrección adicional. LEISA obtuvo datos en una forma especial con el fin de optimizar el sobrevuelo de la sonda, este método consistió en capturar escenas sucesivas de todo Plutón en una disposición de 256 x 256 valores, en donde en una dirección se varía espacialmente como una imagen normal, pero en la otra se varía espacial y espectralmente, es decir, a medida que cambia la superficie de Plutón también cambia la longitud de onda capturada (H. Weaver & Taylor, 2016). El resultado final después de una sola toma se observa en la **Figura 3-13**.

Figura 3-13: Método de toma de datos del instrumento LEISA. La imagen muestra la disposición final de los datos luego de una captura. El eje X cambia en posición, mientras que el eje Y cambia en posición y longitud de onda. La línea negra separa los datos de baja y alta calidad.

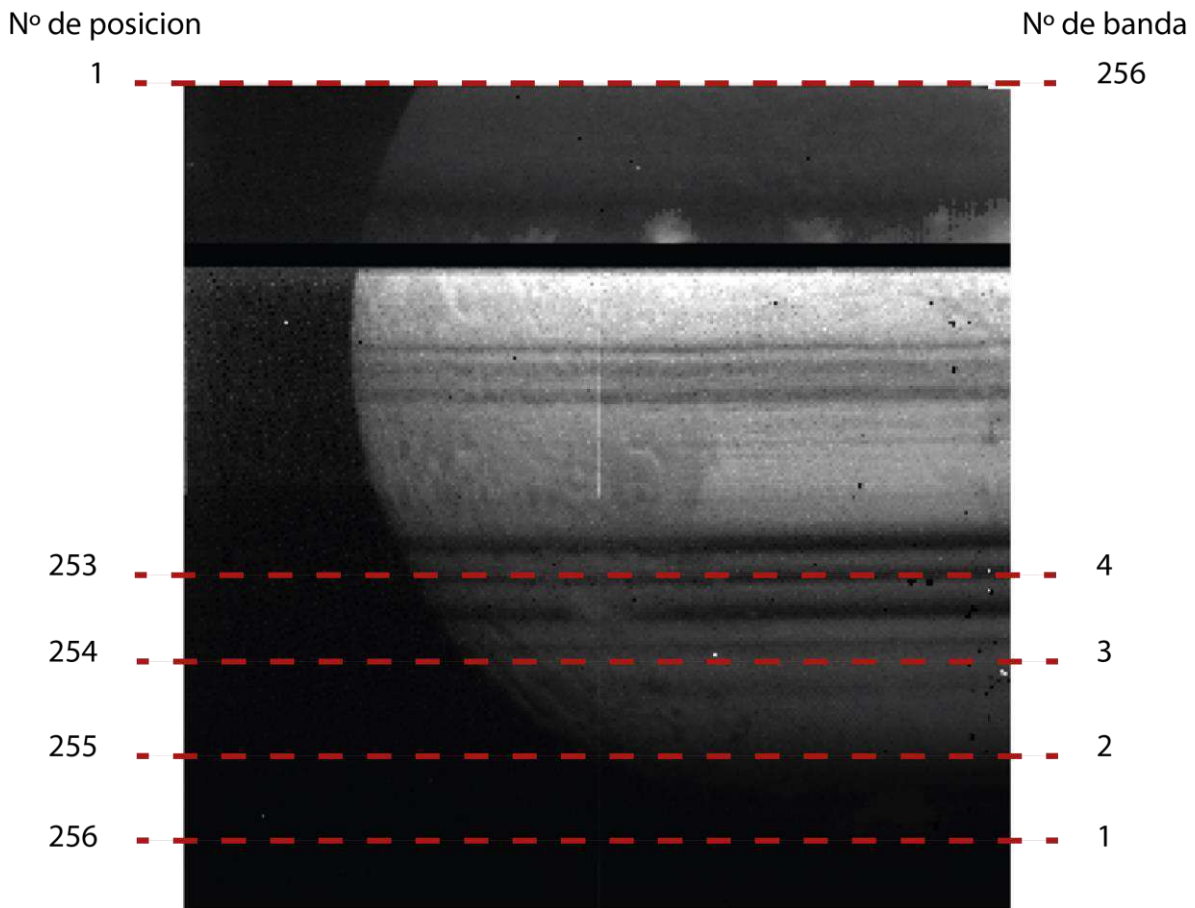


Fuente: Modificado de (H. Weaver & Taylor, 2016).

Dado que cada una de estas capturas se tomó de manera sucesiva se presentó otro tipo de distorsión. La sonda se movía en una dirección a gran velocidad, de modo que cada nueva captura estaba desfasada con la anterior. Esto tuvo una incidencia en la forma final del cubo multispectral, dándole una disposición que no era adecuada para la interpretación de los datos (Team, 2017).

Como uno de los bojetivos de este trabajo era obtener firmas espectrales puntuales de diversas regiones de Plutón, fue necesario reorganizar los datos de modo que fuera posible extraer de una posición fija sobre la superficie los datos tomados en todas las longitudes de onda. El proceso de transformación se realizó en el software Excel, como los datos en la posición del eje X no necesitaban una mayor reorganización simplemente se les asignó un número de orden de 1 a 256.

Figura 3-14: Cubo espectral de LEISA. Se muestra el cubo espectral LEISA 3 antes de ser organizado, los números de posición y banda fueron asignados a cada columna para luego ser reorganizadas en la posición deseada.



Por otro lado, el eje Y necesitaba una compleja reorganización. A cada una de las filas en los datos se les asignó un número de posición con base en el área de Plutón que cubría, y también se le asignó a cada una un número de 1 a 256, correspondientes a la longitud de onda asociada (**Figura 3-14**). Una vez cada uno de los datos fue clasificado con estos dos números representativos de las variables de su eje, fue posible reorganizar todo el cubo con base en estos valores, permitiendo así obtener la firma espectral de un punto específico.

Para este trabajo se utilizaron dos cubos espectrales, estos fueron llamados LEISA 3 y LEISA 4. Se escogieron sobre los demás cubos por ser contener la información más completa, extensa y de mejor calidad. Ambos cubos poseen el mismo rango de longitud de

onda: de 1,225 a 2,5 μm y de 2,1 a 2,25 μm en el segmento de alta calidad. LEISA 3 realizó un total de 878 capturas, y LEISA 4 962.

Los datos en bruto tenían unidades de irradiancia ($\text{ergs/sec/cm}^2/\text{\AA/sr}$), esta propiedad física describe el flujo de energía emitida o reflejada por un objeto y es proporcional al albedo o reflectancia, de modo que las unidades originales fueron adecuadas para la interpretación. Se realizó una corrección adicional para eliminar los valores negativos dentro de los datos, ya que estos no tienen ningún valor real en la interpretación, y seguramente son producto de errores en el sensor. Por último, es importante mencionar que no se realizaron correcciones totales en cuanto a errores instrumentales y posibles alteraciones por la velocidad e iluminación de la sonda. Esto generó un corrimiento evidente en los datos obtenidos. Afortunadamente, la calidad fue suficiente para obtener información científica valiosa, aunque mediciones más exactas requerirán de una mayor corrección de estos productos.

4. Análisis geomorfológicos

Los datos de alta calidad de LORRI son útiles para diferentes tipos de análisis debido a su resolución, los paquetes de datos LD y MD cubren un área bastante grande, de modo que las estructuras superficiales más grandes y regionales pudieron ser identificadas y analizadas en estos paquetes. Por otra parte, los dos mosaicos de alta resolución cubren un área considerablemente menor, pero su alta resolución permitió el estudio más detallado de las geometrías y escalas de los elementos morfológicos más pequeños en Sputnik Planitia.

4.1 Geomorfología general

La zona de Sputnik Planitia no solo es interesante por su propia existencia, sino también por su configuración con respecto a sus zonas circundantes. A primera vista fue fácil notar que SP posee una altitud considerablemente baja al compararse con sus alrededores a excepción de un par de casos particulares: Hillary montes es una cordillera montañosa de bastante elevación que recorre el margen izquierdo de SP de norte a sur y en la zona más sur, una estructura semicircular de altura considerable y con una gran depresión central. Otras estructuras de menor envergadura fueron reconocidas a través de toda Sputnik Planitia.

Uno de los objetivos de este trabajo fue conectar la dinámica de cada una de las pequeñas estructuras de SP con los procesos geológicos a gran escala, y así obtener una visión integra de su formación y evolución. El análisis se realizó desde las estructuras más grandes hacia las más pequeñas, de modo que la información recolectada globalmente fuera relevante y consistente al disminuir la escala de interpretación, siendo al final el conjunto de características de las estructuras pequeñas las que corroboraron los procesos mayores.

No se les adjudico el nombre de mapas geológicos a los productos de este análisis, pero se realizó la máxima conexión posible entre las unidades geomorfológicas descritas y los posibles cuerpos rocosos asociados. Las unidades que se definieron cumplen todas con la definición de unidades geomorfológicas y geológicas para cuerpos planetarios establecida por Tanaka, Skinner, & Hare, 2011 y Wilhemns, 1972. Donde se establece que los cuerpos definidos deben ser discretos, cumplir el principio de superposición, y el que las leyes de corte pueden ser aplicadas a ellos.

Los nombres aquí utilizados son generalmente informales, ya que hasta la fecha de este trabajo apenas unos pocos nombres han sido definidos, principalmente en Sputnik Planitia. Se usaron nombres que han sido acuñados en la bibliografía y directamente se nombraron a ciertas geoformas a las que aún no se les han asignado ninguna denominación.

4.1.1 Terrenos

En el análisis de este trabajo se atribuyó el nombre “terreno” a las estructuras más grandes del sistema y que pudieran ser diferenciadas por límites discretos. Estas macro-estructuras a su vez encierran una serie de características que las diferencian de los demás terrenos. Se utilizaron principalmente como elementos discriminadores la textura, albedo superficial, elevación topográfica y donde aplicara, la densidad de cráteres. La **Figura 4-1** muestra los terrenos definidos para la zona de estudio. Todas las imágenes explicativas de los terrenos están dirigidas hacia el norte.

Como el principal interés geológico en Plutón se concentra en Sputnik Planitia, este fue el terreno analizado a más detalle, debido también a la utilización de los mosaicos HD. Los paquetes LD y MD muestran una serie de tierras que son claramente diferenciables de Sputnik Planitia y unas con otras. Los límites e interacciones entre terrenos fueron revisados con mayor cuidado, especialmente las fronteras con Sputnik Planitia. Los análisis fueron realizados utilizando en conjunto una representación plana de los mosaicos y el DEM, y una escena en tres dimensiones de la zona de estudio (**Figura 4-2**).

Voyager Terra (VT): Se encuentra en la parte norte observada por New Horizons, desde 45° N hasta el polo norte. Limita al sur con Sputnik Planitia, al sureste con Sputnik Highlands y al suroeste con Cthulhu Regio (CR). Abarca la totalidad de la zona septentrional de Plutón extendiéndose por varios miles de kilómetros cuadrados, probablemente continua hacia el hemisferio no observado.

Figura 4-1: Mapa de terrenos definidos para la zona de estudio. Cada terreno es definido por su textura, albedo superficial, elevación topográfica y donde aplicara, la densidad de cráteres.

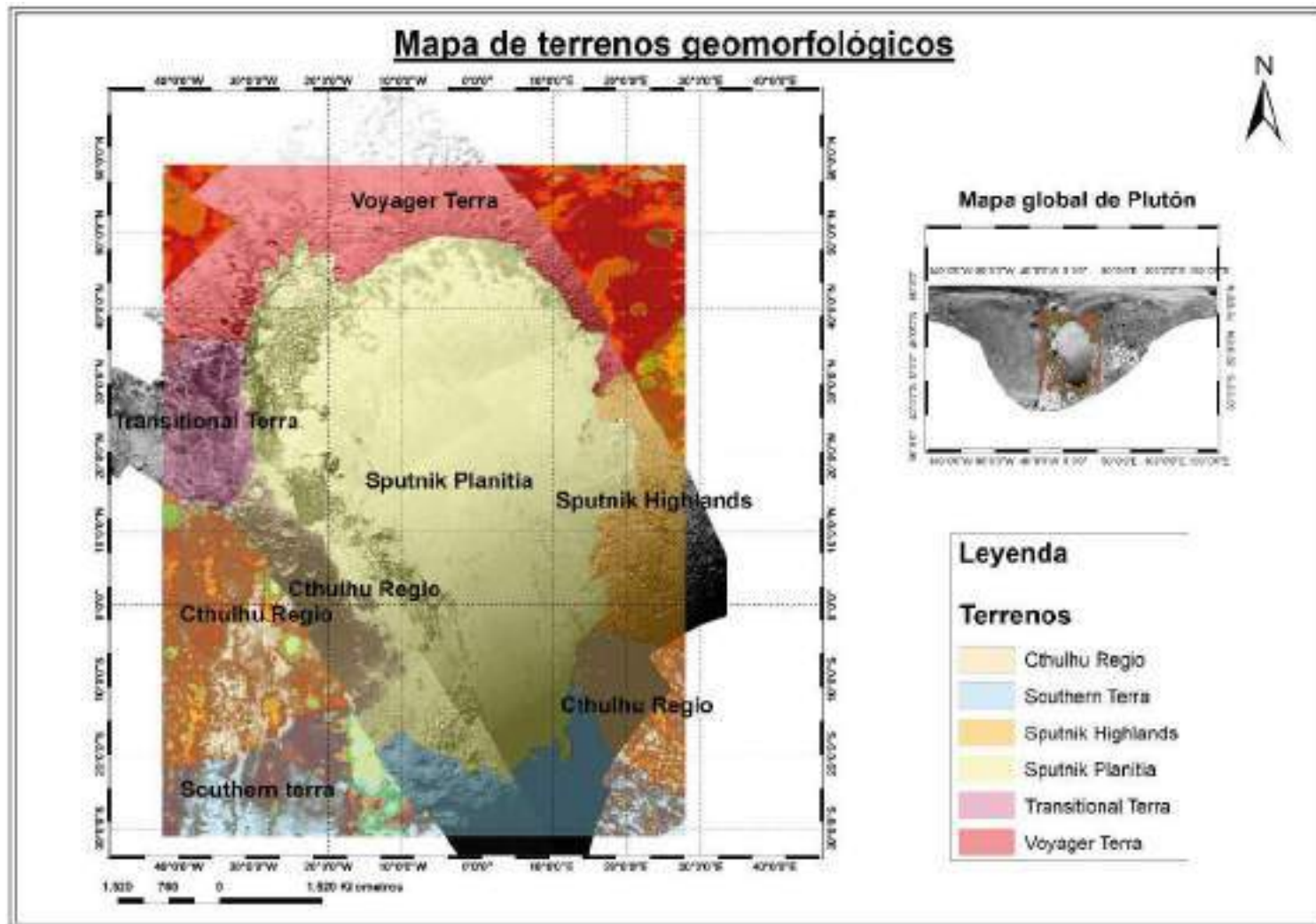
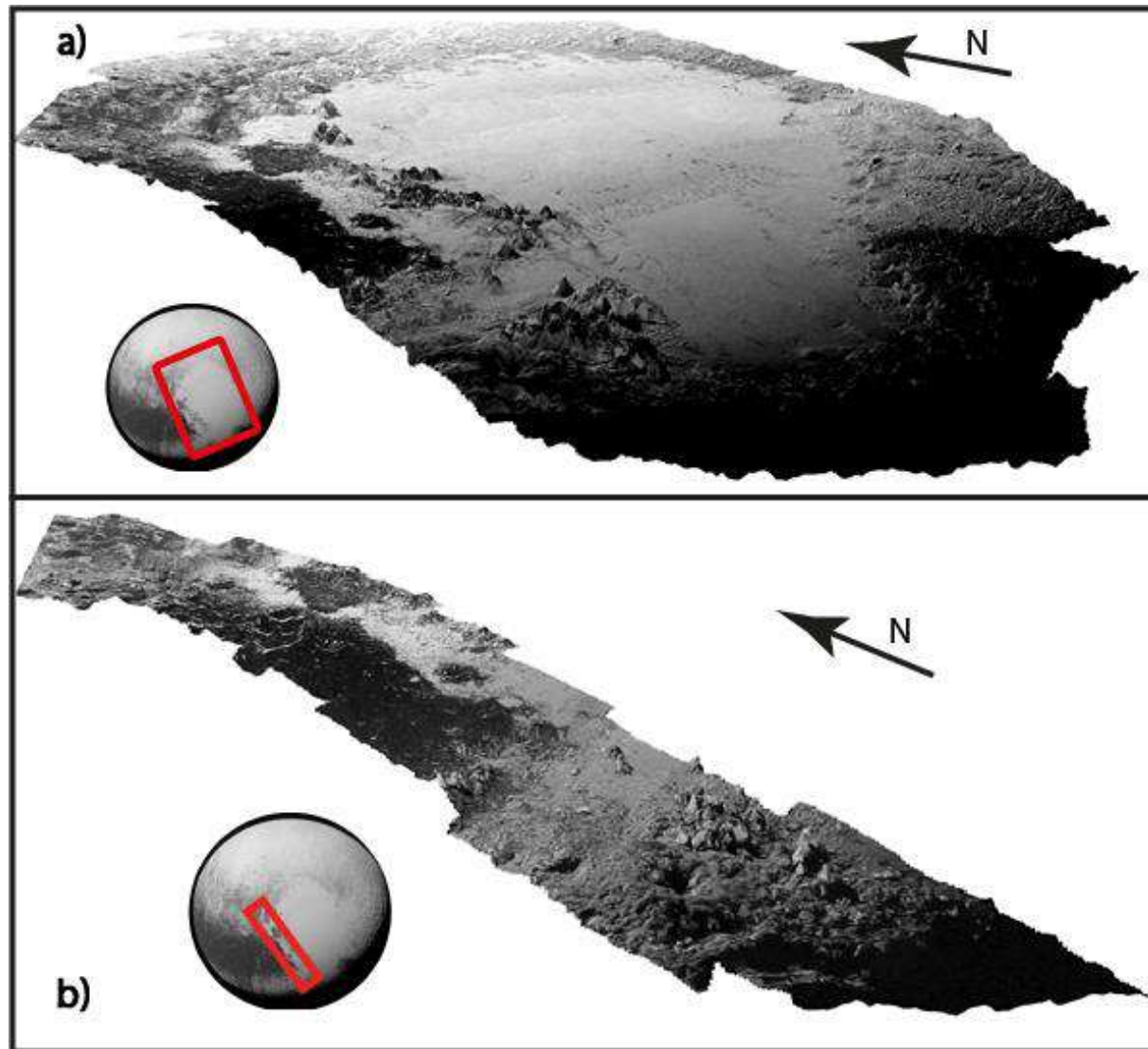
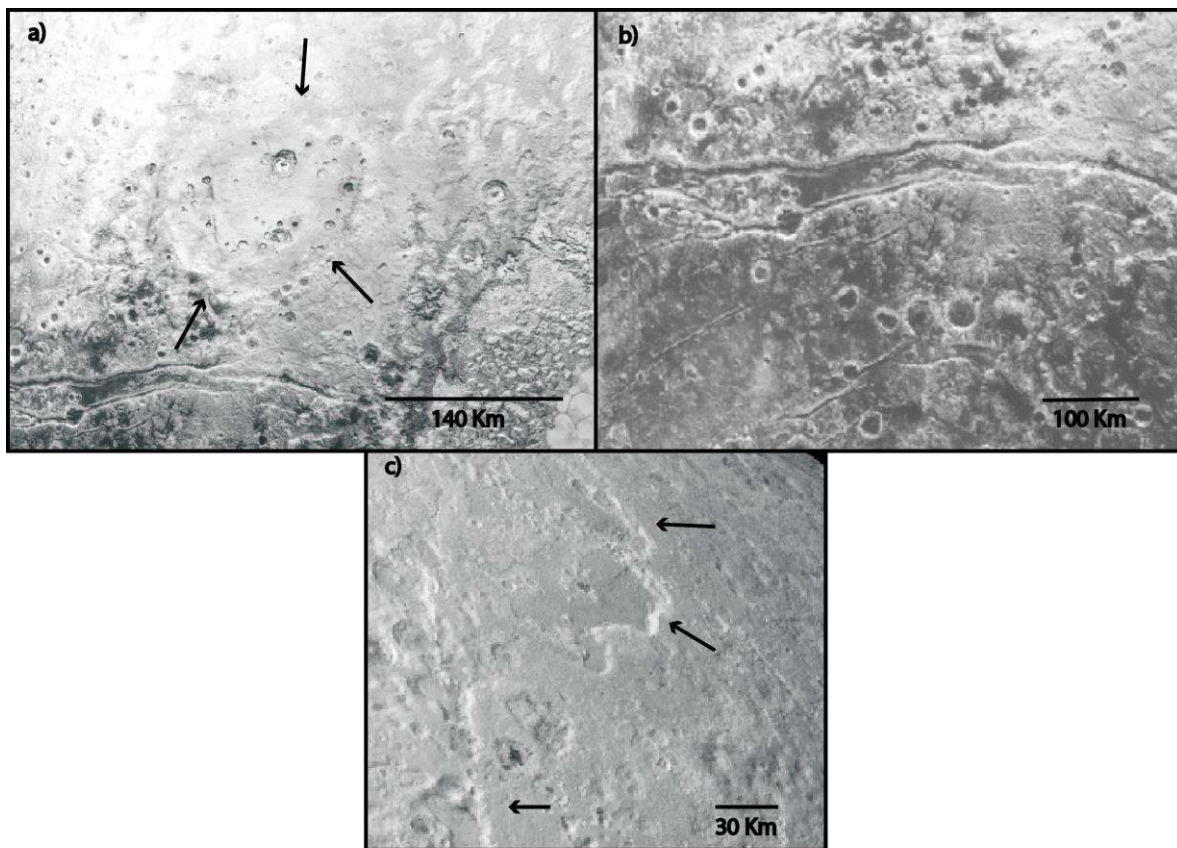


Figura 4-2: Visualizaciones en tres dimensiones de la zona de estudio, a escala vertical real. a) Mosaico LD, b) Mosaico MD.



Este terreno es el más típico de Plutón si se compara con otros cuerpos gélidos, su textura es ligeramente rugosa, muestra variaciones leves en elevación y sin embargo, su superficie es muy constante. Sus terrenos son generalmente altos, a excepción de unas depresiones que se forman en los cráteres y algunas fracturas. El albedo de la zona es alto, aunque este efecto es acentuado por la mayor incidencia solar. Es evidente que VT posee muy pocas regiones de tonalidad oscura, las cuales son tenues y muy dispersas, esto parece indicar una homogeneidad en su composición.

Figura 4-3: Principales geoformas de Voyager terra (VT). a) Cráter Burney, la estructura de impacto más grande de Plutón, b) Duzumi Fossae, cañón de más de 500 km de largo, c) Extensa fractura a la altura del paralelo 70°, posiblemente un gran acantilado.



Las características que más destacan en VT son sus numerosos cráteres de impacto y algunas fracturas lineales en su corteza. Los primeros varían en tamaño, pero se encuentran distribuidos de manera homogénea por toda la región, la densidad de cráteres es muy similar a la que se observa en Cthulhu Regio. Cabe destacar el cráter Burney (**Figura 4-3, a**), tiene un diámetro cercano a los 200 km y es el cráter más grande observado

en Plutón, es bastante viejo ya que se le encuentran superpuestos cerca de cinco cráteres de tamaño considerable, además de mostrarse deformado en uno de sus ejes. La alta densidad de cráteres y demás evidencias de su antigüedad indican que VT es un terreno bastante antiguo.

Dos fracturas de tamaño considerable son vagamente visibles en las latitudes más altas de VT, una de ellas parece ser un largo acantilado que separa unas tierras bajas de otras de mayor altura (**Figura 4-3, c**), mientras que la segunda es una “*fossae*”, un cañón profundo que incide abruptamente la superficie. Se cree que estas estructuras son formadas por distensión en la corteza, que al reaccionar de manera frágil se fractura en estas geoformas profundas y alargadas (Pappalardo & Reynolds, 1997).

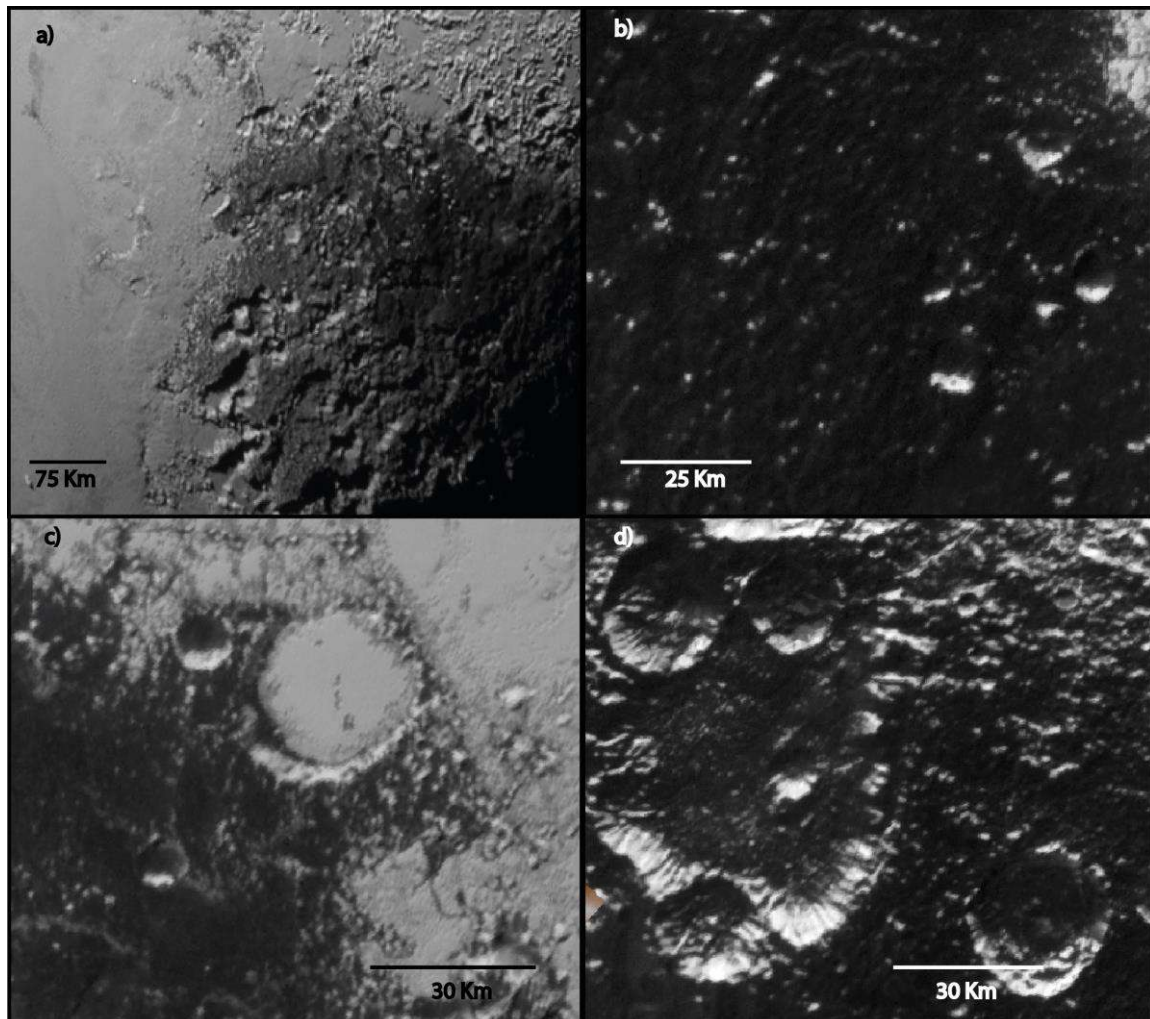
La mayor de estas estructuras es *Duzumi Fossae* (**Figura 4-3, b**), una fosa que se extiende por 560 km en el límite sur de VT, esta fosa posee acantilados de hasta 2 km de altura y termina casi en el límite con SP. Se prolonga en dirección E-W, curvándose hacia abajo en el oeste. Además, es paralela a otra serie de fosas ubicadas en CR, este alineamiento parece indicar un fuerte evento de distensión en dirección N-S que habría afectado la zona ecuatorial de Plutón.

Cthulhu Regio (CR): Este terreno es la característica que más resalta de Plutón además de Sputnik Planitia, es una extensa zona de color marrón que abarca casi una cuarta parte del hemisferio observado (**Figura 2-8**). Se extiende por más de 2000 km² sobre el ecuador plutoniano y se encuentra el oeste de SP. Sus límites no son observables así que podría extenderse hacia el sur de Plutón e incluso en el otro lado del globo.

Siguiendo los parámetros establecidos para la diferenciación de terrenos, CR es drásticamente diferente de los demás territorios: tiene una textura muy rugosa, es una zona muy elevada, su superficie está saturada de cráteres y principalmente, su albedo es muy bajo. Otra zona con características muy similares es observada hacia el sureste de SP (**Figura 4-4, a**), otros autores han clasificado este lugar como *Krun Macula* (White et al., 2017), pero en el análisis aquí realizado no se encontró mayor diferencia con CR, de manera que se clasificó como parte de este terreno.

Cthulhu Regio presenta una superficie bastante corrugada, se observaron una serie de ondulaciones con una tendencia hacia el NE (**Figura 4-4, b**), esta rugosidad es producto de variaciones moderadas en altura de alrededor de 400 metros desde las crestas a los valles. Estas características son más visibles en la parte norte de CR, hacia el sur el terreno se vuelve más homogéneo hasta que limita con SP.

Figura 4-4: Principales geoformas de Cthulhu Regio (CR). a) Región similar a CR ubicada al este de SP, b) Terrenos ondulados, generados por pequeños gradientes en relieve, c) Cráter invadido por glaciares de SP, d) Cráter deformado en dirección N-S.



Resalta especialmente la alta topografía de CR, su límite con SP hacia el este es un escarpado descenso en altitud hasta llegar a la planicie. Se calculó que sus alturas varían desde los 1100 metros hasta cerca de 4000 metros de altura, las transiciones de altitud se dan generalmente con bajas pendientes, a excepción de una pequeña cadena de montañas que se alzan en el borde sur.

El criterio de densidad de cráteres puede ser fácilmente aplicado el CR, tan solo en el mosaico MD se contaron más de 20 cráteres con un diámetro mayor a 20 km. El más grande de ellos tiene un diámetro mayor a 95 km, este cráter resulta interesante por su forma ovalada (**Figura 4-4, d**), siendo este un patrón recurrente en los cráteres más grandes, posiblemente efecto de una antigua deformación cortical. Los cráteres tienen un importante

valor astrogeológico ya que su densidad superficial es un método de datación relativo. Entre más antigua sea una superficie, más cantidad de impactos habrá recibido por el tiempo que lleva expuesta. La alta evidencia de estos eventos en CR permite concluir que es el terreno más viejo en la zona de estudio, siendo su concentración mucho mayor que en los demás territorios. Una cantidad semejante de impactos es apreciable en *Krun Macula*, reforzando la posibilidad de que sea de origen similar a CR.

El factor más llamativo de CR es indiscutiblemente su albedo, la cantidad de luz que refleja está por debajo del 10% en el rango visible, esta cualidad es única en Plutón y también de los cuerpos gélidos en general. Se observó que en ciertas zonas de CR el albedo sube drásticamente hasta ser similar al del resto de terrenos de Plutón, este fenómeno se da principalmente en los escarpes de los bordes de los cráteres, es decir, zonas de altas pendientes, esto parece indicar que el material de bajo albedo es superficial y se encuentra recubriendo un material con un albedo más alto, como también lo menciona Stern et al., 2015. Esta tonalidad oscura coincide perfectamente con los límites topográficos y texturales de CR, indicando que su proceso de formación está ligado estrechamente con CR. Observando la imagen compuesta del instrumento MVIC (**Figura 2-8**), este material presenta un color marrón oscuro, se ha dicho que probablemente se trate de una acumulación de *tholins*, unas moléculas orgánicas que al interactuar con radiación ultravioleta precipitan como compuestos complejos y de composición muy variada (Protopapa et al., 2016). Unos compuestos similares han sido identificados en los satélites naturales Titán de Saturno y Miranda de Urano, donde estas partículas orgánicas se precipitaron desde la atmósfera y recubrieron la superficie gélida (Brassé, Muñoz, Coll, & Raulin, 2015; Pappalardo & Reynolds, 1997) .

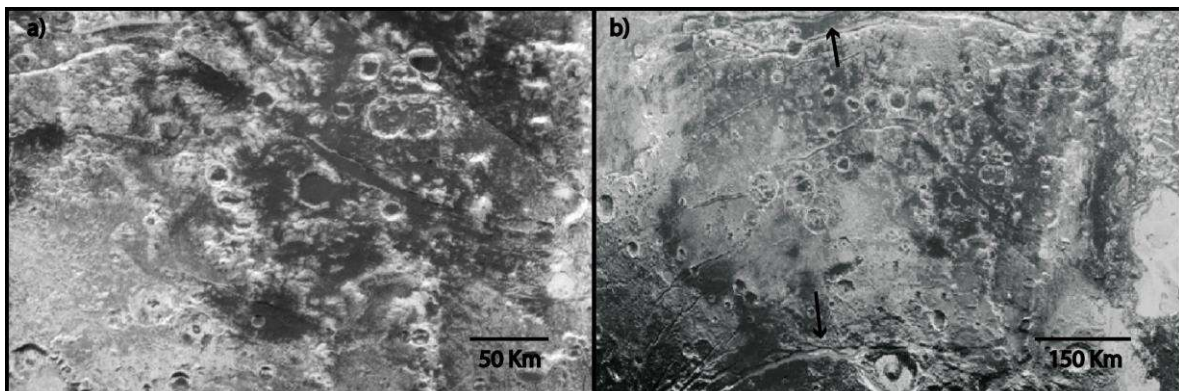
Una interacción interesante se observó entre CR y SP en la parte sur de la zona. Hacia el norte el contacto entre ambos terrenos es de tipo transicional, pero en el sur se observa lo que parece una invasión de los hielos de SP sobre el terreno de CR. Este fenómeno es evidenciado especialmente en un cráter que es rellenado parcialmente por el material de la planicie (**Figura 4-4, c**), este cráter claramente pertenece a CR, por su gran tamaño y cierto grado de deformación en uno de sus ejes. Este efecto también puede ser observado un poco al norte, en donde una “isla” de material oscuro y craterizado se encuentra rodeada por el material liso de SP. La relación entre los distintos hielos apunta a un proceso de regresión de SP, dejando al descubierto partes de Cthulhu Regio que anteriormente estuvieron enterradas. Esta interacción muestra claramente que SP es mucho más joven

que CR, y que además ocurrió un proceso de relleno sobre las zonas más bajas de CR, la forma en que se presenta el contacto indica un comportamiento plástico-liquido de los glaciares invasores, dando pistas sobre la naturaleza de Sputnik Planitia.

Transitional Terra (TT): Este terreno no ha sido diferenciado por ningún autor anterior. Al aplicar los criterios de diferenciación seguidos por este trabajo se consideró necesaria la diferenciación de esta zona con respecto a VT y CR. Esencialmente es bastante similar a CR en textura, elevación y densidad de cráteres, pero se diferencia en su albedo.

Este terreno se caracteriza por la variación en su albedo (**Figura 4-5, a**), presenta regiones de tonalidad oscura similar a CR, y otras bastante claras similares a VT, los cambios en albedo no siguen un patrón en particular aunque las zonas oscuras parecen concentrarse en terrenos ligeramente más bajos (Giri et al., 2016). Dado que TT parece una franja de variación de albedo desde CR y VT, se plantea que el decrecimiento progresivo de albedo sea efecto de cubrimiento por *tholins*.

Figura 4-5: Principales geoformas de Transitional Terra (TT). a) Patrón moteado generado por la variación de albedo, b) Las flechas señalan arriba *Duzumi fossae* y abajo *Virgil fossae*, los cañones que limitan TT.



Plutón posee una inclinación de 17° , que junto a su largo periodo de translación de 248 años y una rotación cada 6 días provoca que una parte del planeta enano se encuentre en la oscuridad a lo largo de muchos años. Estas diferencias en insolación generan un gradiente de temperatura suficientemente alto en las zonas iluminadas para hacer circular los compuestos volátiles de Plutón (Protopapa et al., 2016). Esto explicaría el patrón de dispersión de colores en TT, indicando que la zona tiene la temperatura justa para empezar a sufrir procesos atmosféricos similares a los que ocurren en VT, la zona más iluminada.

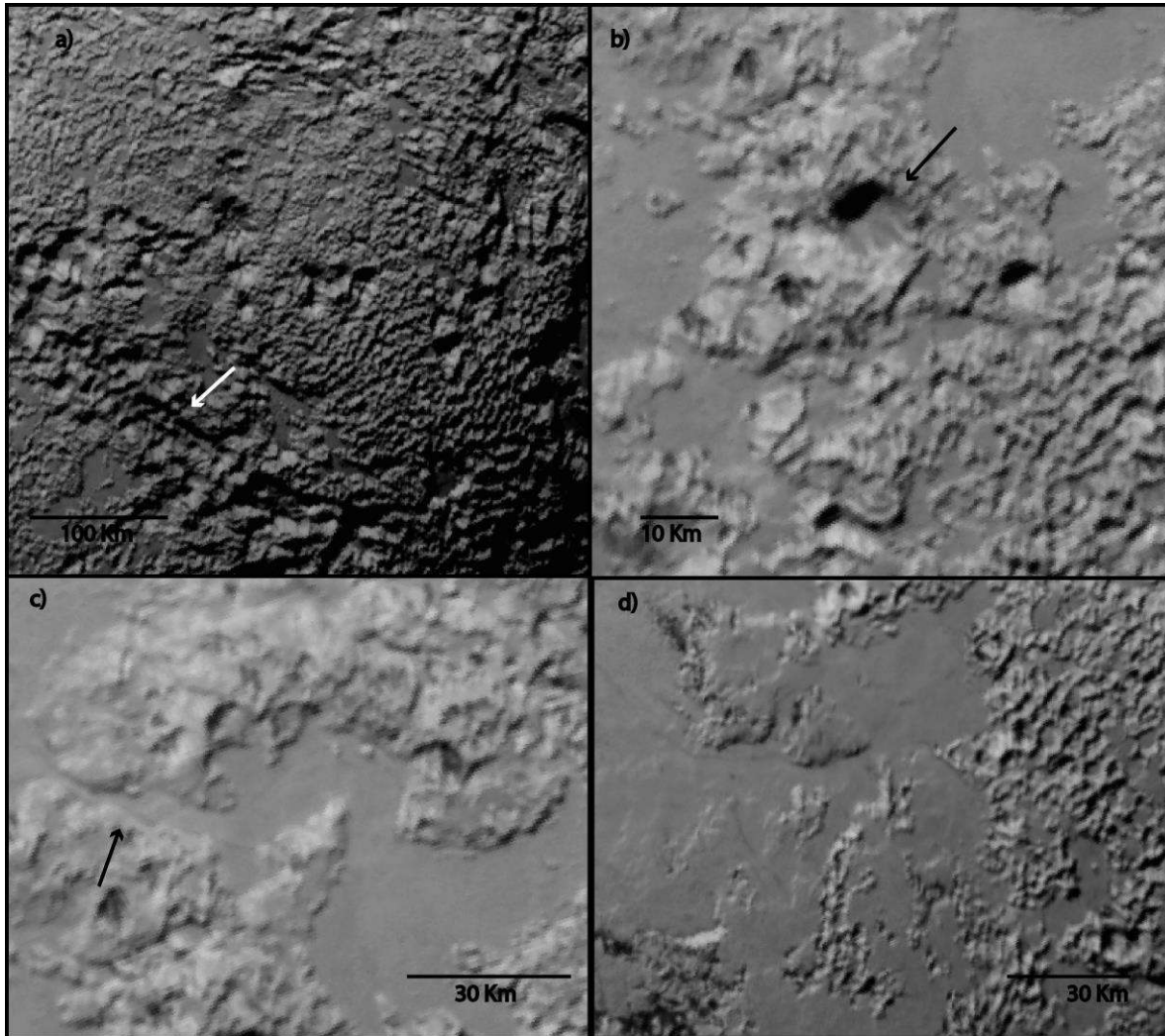
Resulta interesante como TT esta limita al norte con *Duzumi fossae* y al sur con *Virgil fossae* (**Figura 4-5, b**), ambas fracturas son los cañones más grandes de todo Plutón. No parece que estas estructuras estén condicionando de alguna manera el albedo de la zona, pero limitan en terreno transicional de una manera tan exacta que es necesario realizar un análisis más a fondo.

Sputnik Highlands (SH): J M Moore et al., 2015 y Stern et al., 2015 han unido este terreno junto a SP para referirse a una zona llamada *Tombaugh Regio*, este término ha sido acuñado desde la primera clasificación que se realizó en Plutón, debido a que representa la famosa forma de corazón que fue tan llamativa a la primera vista que se le dio. Lo anterior, junto a un albedo muy similar al de Sputnik Planitia (**Figura 2-8**) es probablemente la causa de que se agrupen en una sola unidad. Sin embargo, siguiendo los criterios escogidos en este trabajo la diferencia entre ambos terrenos es bastante clara, de manera que en este trabajo se denominó como Sputnik Highlands a lo que anteriores autores consideran la parte este de *Tombaugh Regio*.

La textura de SH es muy característica, es de tipo moteada y cambiante, lo que también se refleja en su relieve. Es una zona en general muy alta que cambia continuamente su altitud de una manera abrupta (**Figura 4-6, a**). Este relieve es producto de unas geoformas muy particulares de este terreno, estas estructuras han sido catalogadas como “pozos” (White et al., 2017), unos sumideros profundos y semi-redondeados que son rodeados por terreno más elevado, asemejándose a la construcción antrópica del mismo nombre. Se midió que estos pozos llegan a tener hasta 3 km de profundidad con respecto a sus bordes, y algunos de ellos parecen unirse, generando crestas en los bordes altos y profundos valles en los fondos. El más grande de estas geoformas es *Baralku cavi* (**Figura 4-6, b**), un inmenso agujero de 10 km de ancho y cerca de 3 km de profundidad, se encuentra casi en el contacto con SP y llega a ser tan profundo como la misma planicie.

El albedo es muy similar al de SP, lo que indica que al menos en superficie su composición química es parecida, por otro lado, la topografía estrellada muestra que los materiales de los que la están formando tienen una consistencia diferente. No se pudieron identificar gran cantidad de cráteres en el terreno, solo un par de ellos en la zona más norte y con sus rasgos bastante cubiertos, esto indica que SH es una zona mucho más reciente que los demás terrenos hasta ahora mencionados, lo cual también podría estar relacionado con su composición.

Figura 4-6:: Principales geoformas de Sputnik Highlands (TT). a) Geoformas de pozos y crestas, se señala un valle producto de la unión de estas geoformas, b) Baralku Cavi, un pozo de 10 km de diámetro, c) Lagos gélido en la frontera con SP, se señala el canal por donde el material descende hacia la planicie, d) Zona transicional que limita con Sputnik Planitia.

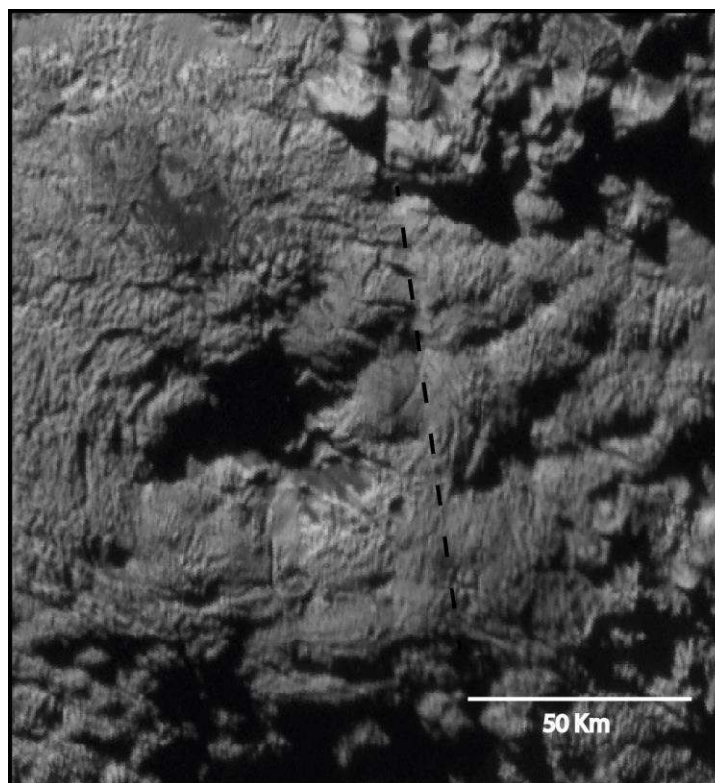


Su interacción con SP es compleja (**Figura 4-6, d**), ocurre una situación inversa a lo que se observó en CR. El material gélido parece fluir desde SH hasta SP, esta interacción es clara en varios lugares hacia la zona transicional entre ambos terrenos, donde números reservorios de material plástico similares a lagos (**Figura 4-6, c**) se ubican en las zonas altas de SH, y desde algunos de ellos bajan conductos en forma de canales hacia Sputnik Planitia, por el gradiente de altitud es de esperar que parte de este material se dirija hacia SP. Algunos de estos lagos gélidos parecen haber perdido su conexión con SP, ya sea porque el terreno en general se elevó, o porque el reservorio se drenó y ya no posee material para trasladar. Unos cuantos de estos lagos gélidos se observan más al interior de

SH, son reconocibles por su superficie plana y lisa, se encuentran generalmente aislados por grandes crestas; las implicaciones de la presencia de estos lagos gélidos en las zonas interiores serán analizado posteriormente.

Southern Terra (ST): Al igual que TT, este terreno no ha sido separado por ningún autor con anterioridad, pero sus características son tan diferentes e importantes que se consideró necesario hacer la separación de SP. Este terreno es el más complicado de analizar, ya que se encuentra en el extremo sur de las imágenes obtenidas por New Horizons, lo que significa que poseen el mayor grado de distorsión geométrica.

Figura 4-7: Principal geoforma de Southern Terra (ST). Se muestra en la imagen la gran estructura redondeada de Plutón, supuesto criovolcán, la parte central es una profunda depresión rodeada de altos bordes; la línea punteada resalta el lineamiento que la separa de Tenzing Montes.



La textura de la zona es más lisa que rugosa y posee un albedo intermedio constante. Hacia la parte oeste del terreno se puede ver una zona de alta topografía y con una superficie continua. Su textura y altitud se asemejan mucho a CR, además de que presenta algunos cráteres de tamaño mediano. La única diferencia con CR es su albedo, parece que su superficie está enteramente compuesta de un material claro, a diferencia de TT, en donde

el cubrimiento es parcial. La baja calidad de los datos en esta región no permite realizar un análisis más detallado.

En la región este aparece una geoforma muy interesante, se trata de una estructura semi-circular de gran envergadura (**Figura 4-7**), aumenta su altura gradualmente desde los bordes hasta su centro, en donde aparece una depresión central que profundiza una distancia considerable. De la depresión central se desprenden unas fracturas radiales, mientras que la estructura tiene lineamientos circulares que siguen la forma general del cuerpo. Se ha especulado sobre si esta geoforma corresponde a un volcán ya que su semejanza con un estratovolcán es considerable, pero con los datos actuales es difícil llegar a una conclusión al respecto. Un lineamiento bastante claro atraviesa la parte derecha de la estructura en sentido N-S, algunas estructuras parecen estar cortadas en ambos lados del lineamiento, por lo que podría tratarse de una falla de rumbo.

Sputnik Planitia (SP): Sputnik Planitia es el terreno más llamativo de Plutón. La misión en si misma fue diseñada de modo que los datos de más alta calidad estuvieran disponibles para esta región. SP es particular no solo por sus características superficies sino también porque indica una actividad y evolución geológica única en el sistema solar.

Este terreno se caracteriza por su textura lisa a excepción de las cadenas montañosas, su topografía mucho más baja que los demás terrenos, y porque toda la zona forma una depresión de casi 2500 km² que está en promedio 2000 metros de altura más abajo que sus alrededores. El albedo de SP es en general mayor al 90%, y su coloración es muy diferente a cualquier otra zona de Plutón. No posee ninguna señal de haber sido impactada recientemente, lo cual indica que es una superficie muy joven. Por la complejidad geológica y geomorfológica de esta zona se decidió hacer un análisis en detalle de las características que conforman a SP.

4.2 Sputnik Planitia

Como se mencionó en el capítulo anterior, SP fue analizada en más detalle que los demás terrenos. Para esto se usaron los mosaicos LD y MD, apoyados por los dos mosaicos HD en las zonas donde tuvieran cobertura, también se hizo uso de una escena en tres dimensiones generada con el mosaico HD (**Figura 4-9**). Se definieron clasificaciones de menor escala dentro de SP, llamadas unidades geomorfológicas, estas fueron diferenciadas con los mismos criterios que los terrenos, pero sumando la variedad

morfológica de la superficie como el principal factor de diferenciación. Se le dio a cada unidad un nombre descriptivo, excepto en los casos donde ya existen nombres oficiales. El mapa geomorfológico se puede observar en la **Figura 4-8**.

4.2.1 Margen Oeste

Esta zona muestra la mayor variedad de unidades en SP, todas ellas concentradas en una pequeña franja de tierras que cambian constantemente de norte a sur. Esta variabilidad de unidades muestra una evolución geológica reciente y cambiante en el planeta enano, al menos en esta zona de Plutón.

High albedo big trench (HBT): Esta unidad se caracteriza por ser la zona más baja de todo SP (**Figura 4-10**) e incluso de todo hemisferio observado de Plutón. No se encuentra en una región interna dentro de la planicie, sino que se ubica en el límite con VT. Esta geoforma se prolonga por la zona noroeste de SP, es bastante delgada y se extiende en sentido N-S (

Figura 4-11 4-11, c), fue separada en dos unidades por su reflectancia, ya que la parte norte tiene un albedo más alto que hacia su parte inferior. Esta sección de la fosa es más ancha y se tiene un rumbo casi N-S hacia el sur.

La región muestra una textura rugosa, parece estar compuesta por bloques de tamaños variados. Sus límites son claros con las demás unidades y su material tiene una consistencia diferente a la de sus alrededores. Por lo anterior se interpretó que al ser un bajo topográfico puede actuar como un depocentro para las unidades aledañas, esto es respaldado por la heterogeneidad en los materiales de su superficie, que indican proveniencias variadas.

Esta gran depresión se encuentra justo entre los terrenos altos de VT y la extensa cadena montañosa Hillary montes. Que el terreno más bajo de Plutón se encuentre en este punto presenta implicaciones que serán discutidas más adelante.

Figura 4-8: Mapa de unidades geomorfológicas o fotogeológicas de Sputnik Planitia. Se muestra el trazo del perfil 1.

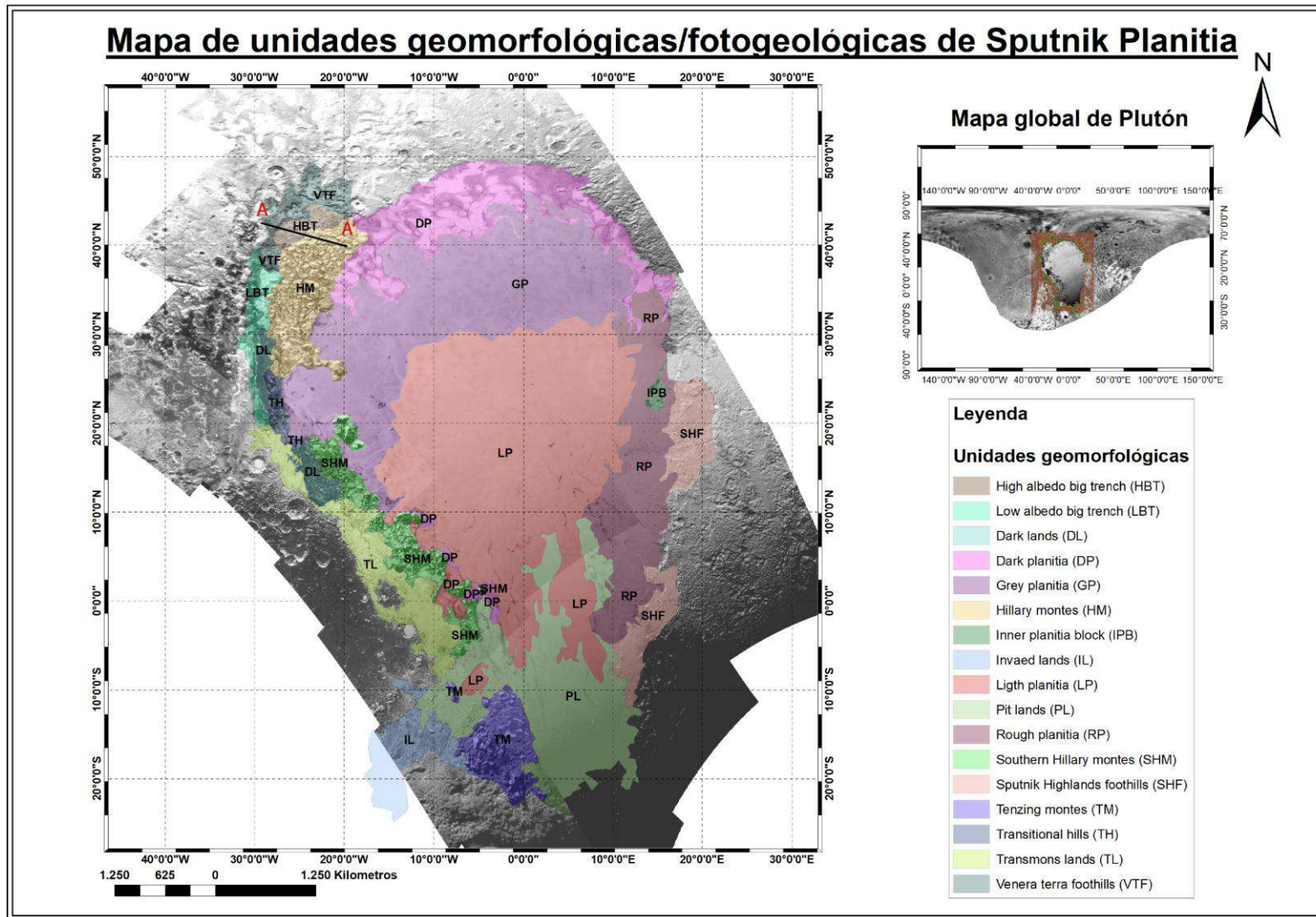


Figura 4-9: Visualizaciones en tres dimensiones del área cubierta por el mosaico HD, a escala real. a) Parte norte de la escena, b) Parte sur de la escena. El recuadro señala el bloque más alto de Sputnik Planitia, en su vista plana.

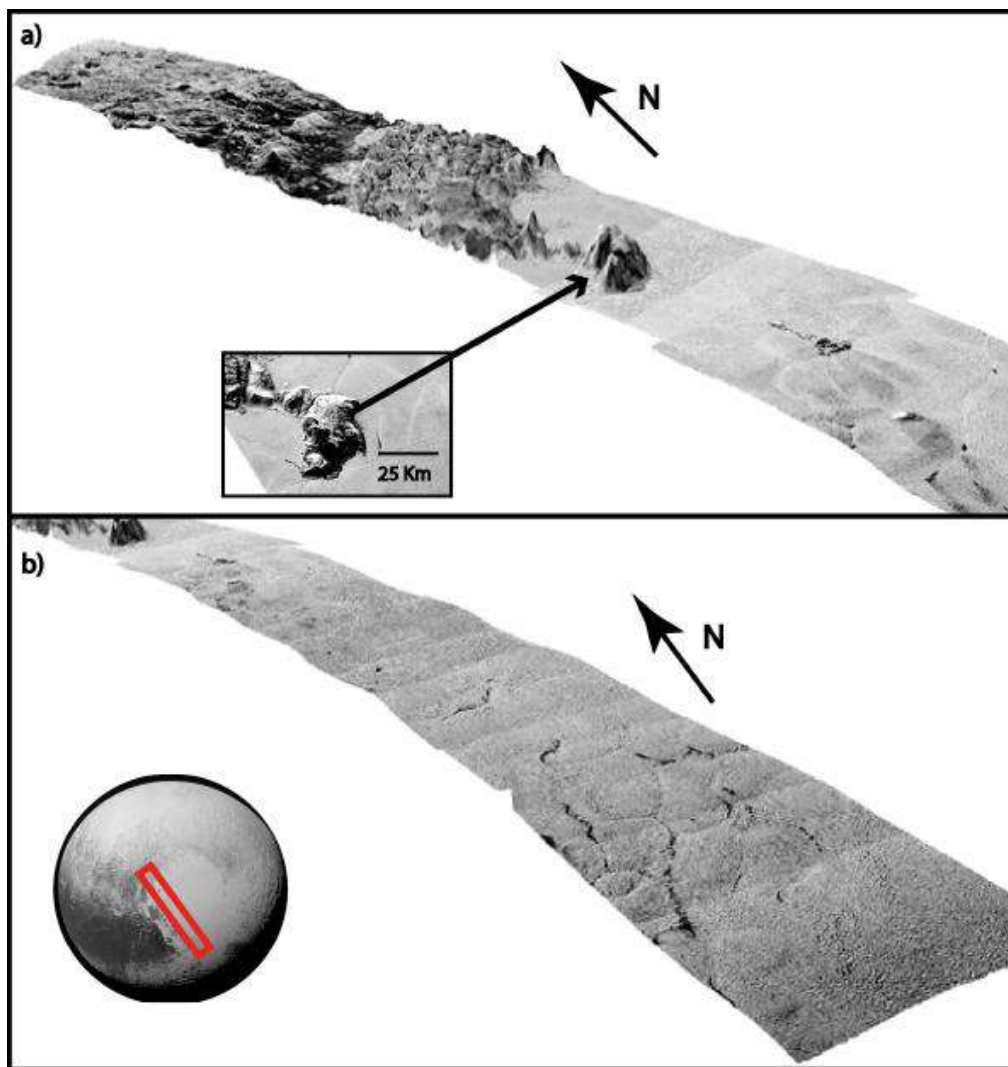
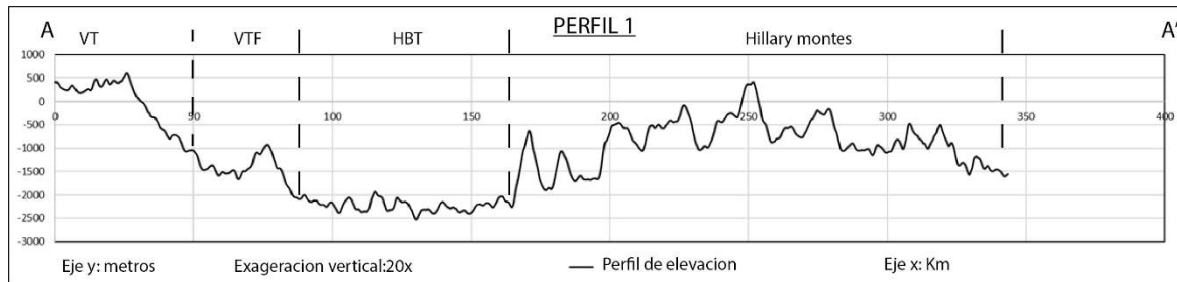


Figura 4-10: Perfil topográfico de la zona noroeste de SP. Se muestra la profunda depresión que se encuentra en la unidad High albedo big trench (HBT), y como la topografía sube al oeste en la unidad Voyager terra foothills, y al este al llegar a Hillary montes (HM). Exageración vertical de 20x.



Voyager terra foothills (VTF): Esta unidad se encuentra inmediatamente al norte de HBT y representa el límite noroeste de SP. Se caracteriza por tener en general bajas alturas, especialmente hacia el sur, donde limita con HBT. La topografía va aumentando suavemente hacia el norte, hasta que finalmente limita con las zonas más altas de VT. Su albedo y textura son muy afines con el terreno Voyager Terra, pero por su baja altura se decidió clasificarlo como una unidad de SP. Se observaron unas pequeñas regiones de albedo muy alto, la baja definición de las imágenes no permitió definir claramente su origen, pero lo más posible es que sea un efecto de sobre iluminación, considerando que esta zona recibía bastante luz al momento de la captura de los datos.

Fue posible diferenciar las formas de esta zona con aquellas de HBT (**Figura 4-11, a**), se observó un mayor quiebre topográfico entre la unidad, y las colinas que la conforman son claramente más resistentes. En su límite con HBT aparece un pequeño escarpe que contacta discontinuamente con el material que tiene debajo, esto nuevamente resulta una evidencia de que la trinchera está siendo rellenada. Hacia el sur parece entrar en contacto directo con Hillary montes, siendo este cierre el que separa HBT de su contraparte de bajo albedo (**Figura 4-11, b**). Entre el contacto de estas dos unidades se concentra un material similar al de la fosa, pero bastante comprimido, si este es el caso, Hillary montes se habría desplazado en dirección noroeste, generando una zona de compresión.

Low albedo big trench (LBT): Esta unidad es la continuación hacia el sur de la fosa luego de ser separada por VTF. Esta unidad empieza en el norte con un reservorio de material gélido, esta geoforma es similar a las encontradas en Sputnik Highlands, por lo cual podrían tener un origen similar. La trinchera continúa hacia el sur más delgada que en su sección superior, esto se debe a que Hillary montes se encuentran considerablemente más cerca al margen izquierdo que en su sección al noroeste.

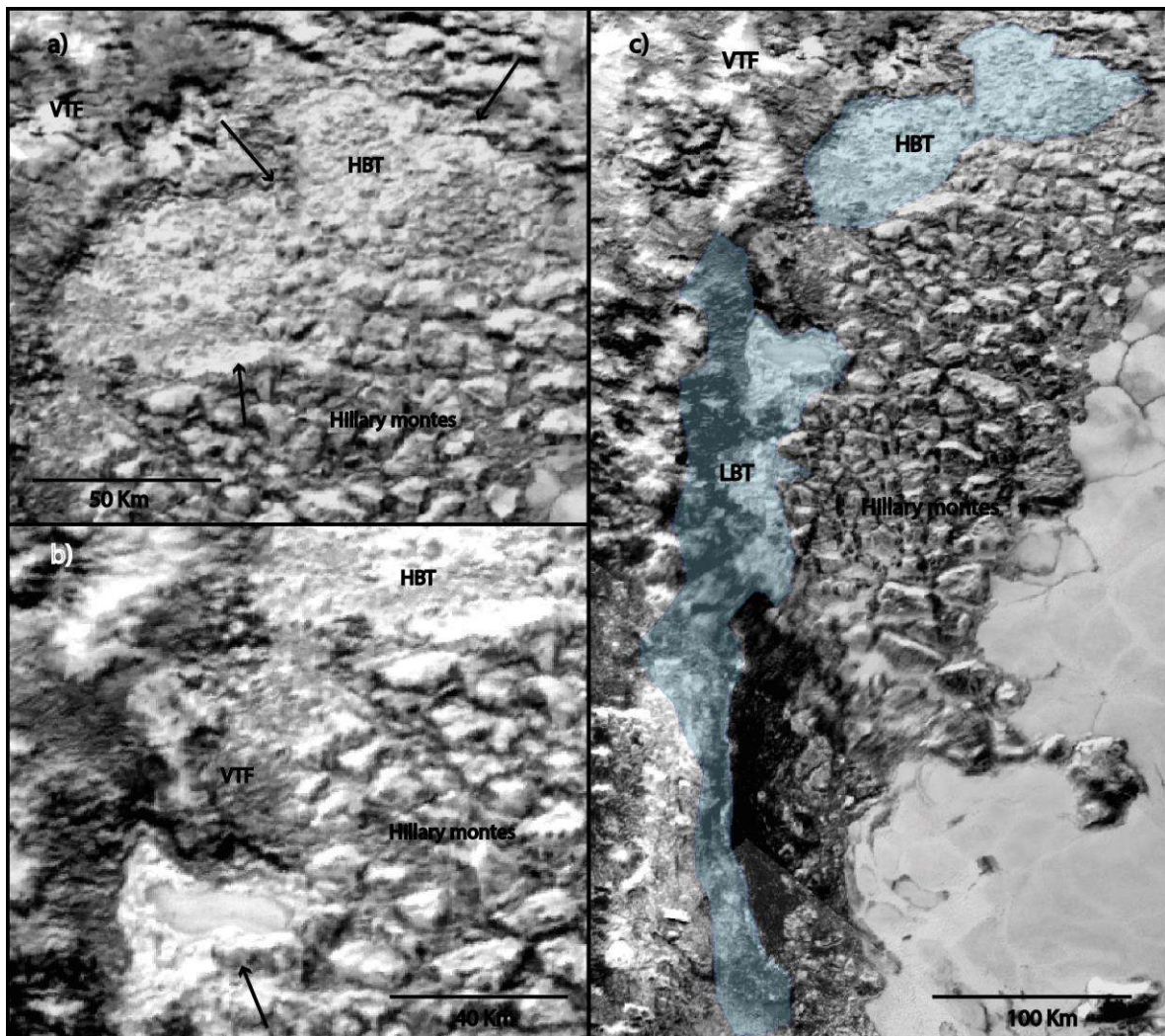
La textura del material superficial es muy similar al de HBT, pero el albedo de este sector es considerablemente diferente, junto al material típico de la trinchera se encuentran parches de material oscuro intercalado irregularmente con el claro. Para esta latitud, cerca de los 30° N, la fosa se encuentra en contacto con Transitional Terra, el cambio en el terreno aledaño podría ser la respuesta al cambio de albedo. Dado que el material que rellena la trinchera es diferente, lo mismo se puede decir de su procedencia, siendo TT una posible fuente del material que se acumula. Cabe resaltar que en la parte más sur de la trinchera, esta limita con la unidad Dark lands, una zona compuesta por material excepcionalmente oscuro que podría ser otra fuente de los fragmentos oscuros en LBT.

La fosa desaparece en su totalidad hacia el paralelo 25° S, junto a las ultima estribaciones de Hillary montes, después se sucede por otra unidad de baja altura, pero con un material superficial totalmente distinto. Que las dos mega-estructuras más importantes de la parte noroeste de SP desaparezcan casi al mismo tiempo es otro indicio de que están relacionadas genéticamente.

Hillary montes (HM): Aparte de la planicie central, esta cadena montañosa es la geoforma más interesante dentro del terreno. Es en todo sentido diferente al material típico de la planicie: presenta zonas con albedo más bajo que sus alrededores, su textura rugosa representa unos materiales muy resistentes, y especialmente sus altas topografías, que llegan a superar los 3000 metros de altura, siendo algunos picos incluso más altos que los terrenos fuera de SP. Más hacia el sur se identificaron otras dos cadenas de montañas con características muy similares, pero que por estar separadas espacialmente de HM se clasificaron como unidades distintas.

Esta cordillera es en general bastante ancha, su parte más gruesa mide más de 150 km (**Figura 4-12, a**). Tiene una orientación N-S, siguiendo una tendencia similar a la gran trinchera, la cual se encuentra a su izquierda y se prolonga hacia el sur de manera casi paralela. La cadena montañosa tiene dos apéndices que se alejan un poco de la tendencia general, el primero de ellos es la región en donde Hillary montes choca con VTF y divide la gran trinchera en dos partes, la segunda es un par de montañas muy altas que se unen al cuerpo principal de HM por un estrecho canal de colinas (**Figura 4-12, c**), esto ocurre en el límite sur de la cordillera.

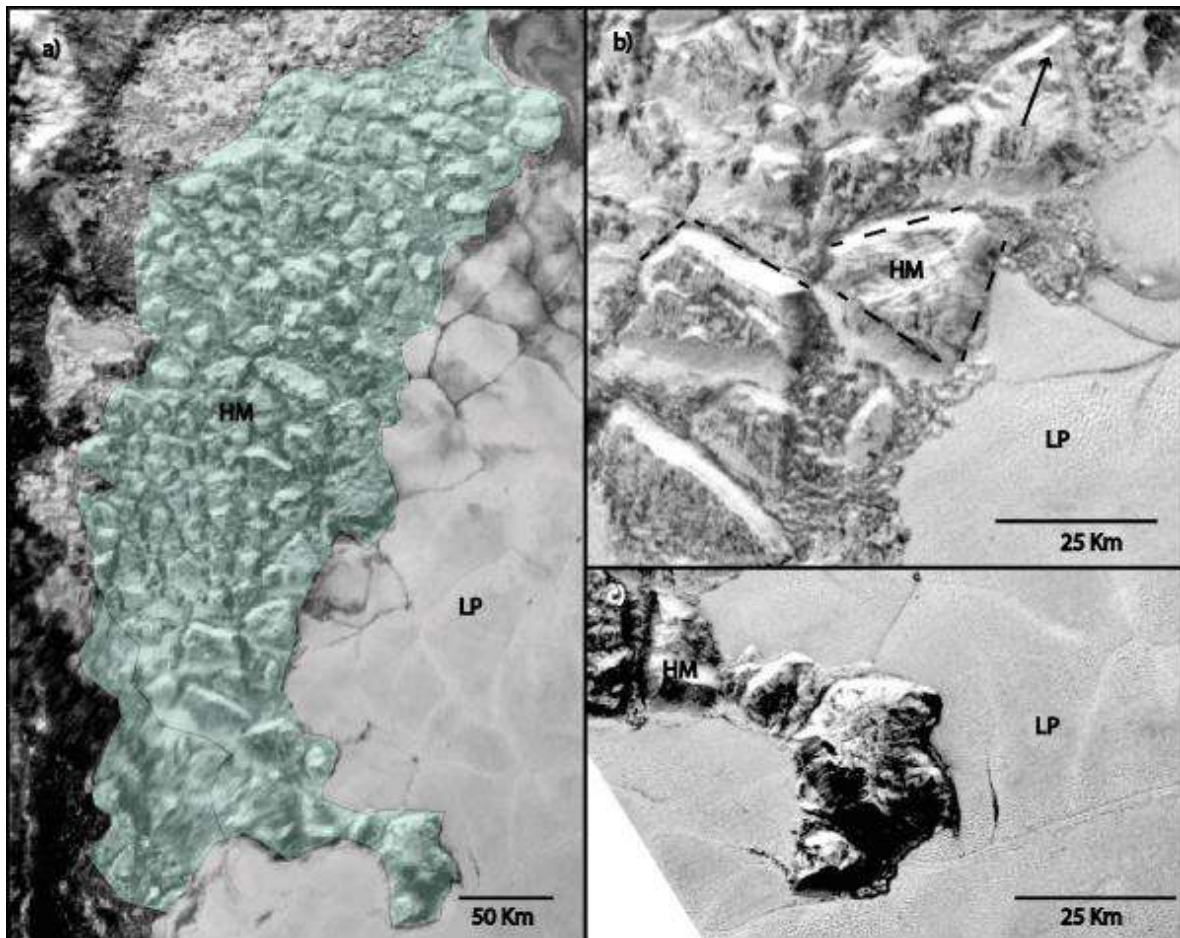
Figura 4-11: Figura del borde noroeste de Sputnik Planitia. a) Vista general de HBT, las flechas señalan sus bordes con otras unidades, b) La unión entre Hillary montes y VTF corta la fosa en dos, la flecha señala el reservorio gélido de LBT, c) Vista general de la longitud de la fosa, 520 km.



Para estudiar las geometrías de las formas que componen a HM se usaron los mosaicos HD, ya que una pequeña parte de ellos cubre esta cadena montañosa. Se determinó que toda la cordillera se compone de bloques individuales con formas semi-triangulares o semi-cuadradas (**Figura 4-12, b**), todos ellos poseen un tamaño casi uniforme de 20 km en sus lados más largos, aunque hacia el límite con la gran trinchera estos bloques reducen considerablemente su tamaño y altura. Cada bloque es separado y aislado de sus compañeros por material aparentemente más blando, dando a la zona una apariencia de bloques embebidos en una matriz plástica, tanto así que se ha comparado con las zonas de caos que se han encontrado en el satélite natural Europa (Stern et al., 2015). Casi cada bloque muestra dos tipos de facetas, una de contrapendiente, bastante extensa y con

pendientes bajas; y otra faceta en forma de escarpe, las cuales son saltos pronunciados que limitan cada bloque con el material que los contiene. Se notó una cierta tendencia de enterramiento común para todos los bloques, los escarpes más altos parecen apuntar en forma de flecha todos hacia en noroeste, mientras que el resto de la estructura se entierra hacia el sureste. Esta particularidad es exagerada por la iluminación, aun así, se distingue una tendencia.

Figura 4-12: Figura de la unidad Hillary montes (HM). a) Extensión total de Hillary montes, b) Formas de los bloques que componen la cordillera, las líneas puntuadas señalan las facetas triangulares, la flecha apunta la dirección general de los bloques, c) Montaña más alta de la unidad, separa del resto por un pequeño estrecho.

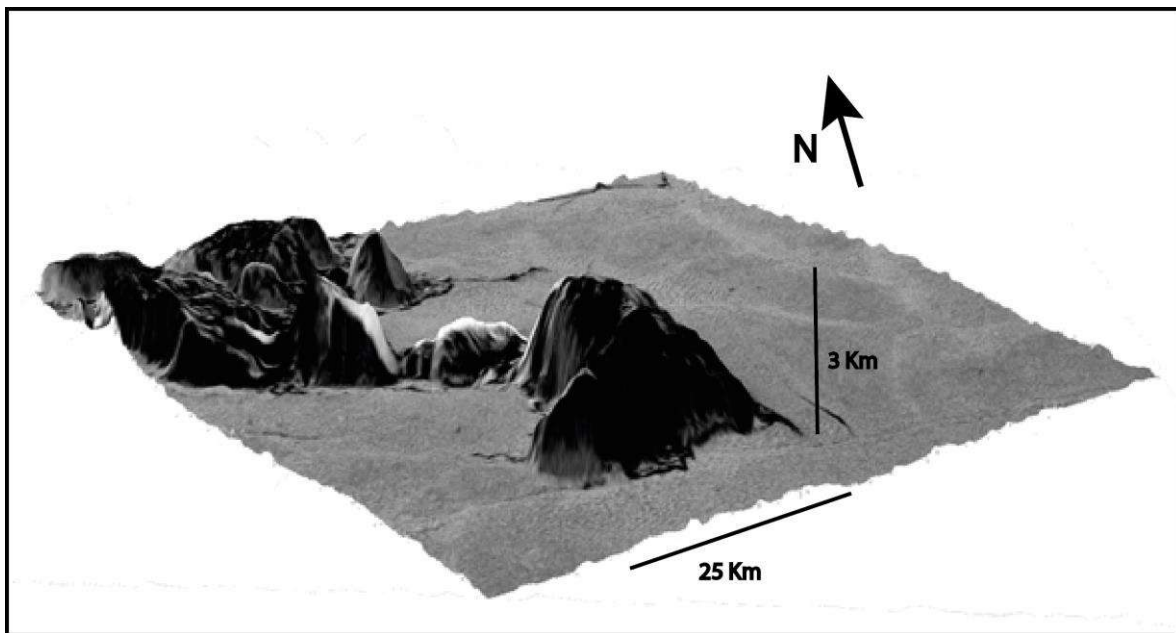


Los bloques parecen tener una variación en su albedo, pero la tonalidad predominante es oscura. En estos lugares el albedo es muy similar al de CR, por lo que son seguramente hielos mezclados con *tholins*. Esta característica parece ligar de alguna forma a estas

cadenas montañosas con Cthulhu Regio. La variación en el albedo que se observa en los bloques es probablemente un efecto de la iluminación, dada la altura de la cadena montañosa no sería de extrañar que sus picos recibieran gran cantidad de luz durante la captura de imágenes. En la **Figura 4-12** se ven bloques con un albedo mayor en sus flancos opuestos al sol, este fenómeno se relacionó a un cubrimiento por parte del material plástico de la planicie.

Casualmente se dio que uno de los mosaicos HD cubre la montaña más alta de HM y de toda Sputnik Planitia. Como se mencionó anteriormente, esta geoforma alcanza los 3500 metros de altura y sobresale de la propia SP. La zona fue reconstruida tridimensionalmente con el software ArcScene, de manera que se observó su geometría a escala real (**Figura 4-13**). La geoforma tiene una configuración similar al resto de bloques, su línea de mayor altura se encuentra apuntando hacia el noroeste, pero a diferencia de los demás bloques, se eleva más de 500 metros por encima del resto de la cordillera. La segunda particularidad de esta montaña es que se encuentra casi separada del resto de la cadena, solo es unida a ella por una pequeña colina.

Figura 4-13: Bloque más alto de Sputnik Planitia. La figura muestra la reconstrucción en tres dimensiones de la montaña más alta de Hillary montes, alcanza los 3 km de altura.



El contacto con el material plástico de Sputnik Planitia se da de manera abrupta, los bordes de los bloques son unas pequeñas estribaciones que están apenas por encima del nivel de

la planicie, pero da la impresión de que actualmente no existe invasión de este material dentro de los terrenos de HM, ni siquiera en la parte más norte, en donde una estructura en forma de lóbulo arremete sobre su coyuntura con HBT (**Figura 4-12, a**).

El cambio de rumbo de HM hacia el noroeste parece ser una deformación causada por la acumulación de material proveniente del centro de SP. Las zonas limitantes con la cadena montañosa son a su vez las partes más altas de la planicie. Si realmente se está produciendo nuevo material en SP, entonces que HM seria una barrera topográfica que detendría el avance los glaciares. Esto explicaría el cambio de rumbo de la cadena y la topografía relativamente alta de la planicie en esta zona, siendo esta última efecto de una acumulación de material gélido que no pudo desplegarse hacia el oeste.

Transitional hills (TH): ya se mencionó como HM no es la única cadena montañosa que se encuentra dentro de SP. Justo al sur de esta se extiende otra cordillera de características un poco diferentes, y ambas están separadas por una serie de colinas de bajas alturas, las cuales conforman esta unidad.

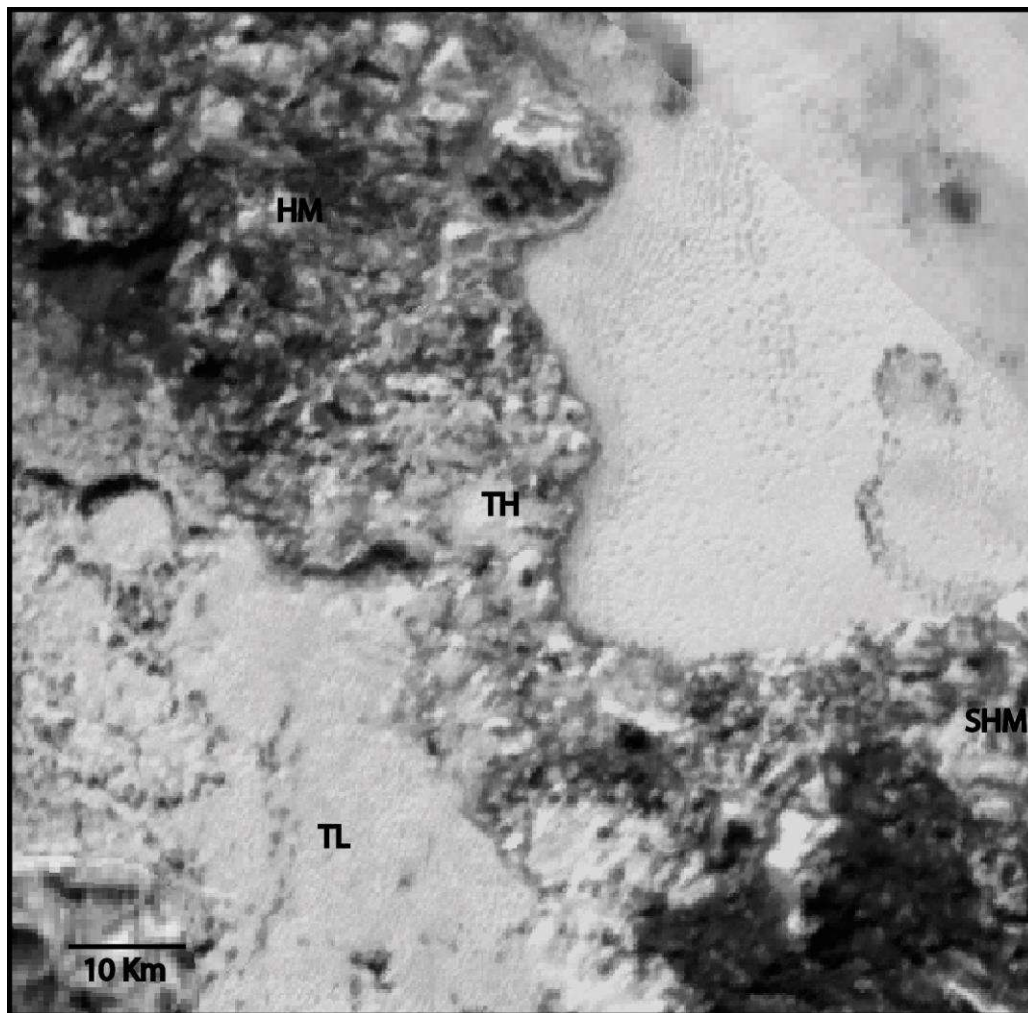
Las colinas de esta unidad son bastante más bajas que ambas cadenas montañosas, pero siguen siendo en su mayoría más altas que la planicie, a excepción de su límite sur, donde hay señales de una invasión de material plástico. La textura es moteada, lo que se atribuye a cambios en la tonalidad de manera similar a HM, de nuevo se le atribuyó esta coloración a la presencia de *tholins*. Cabe resaltar que en esta unidad estas moléculas se encuentran cubriendo un área mucho mayor que en las cordilleras al norte y al sur.

No se detectaron bloques semejantes a los de HM, la unidad está compuesta por unidades de menor tamaño y con formas menos definidas que las montañas individuales del norte. Hacia el norte y sur tiene unos límites transicionales con las cordilleras, de manera que es posible que comparta su génesis. Esto es soportado por su aspecto, ya que es similar a las estribaciones que componen los bordes de HM.

En la parte central de la unidad se alcanza la menor altura de la barrera topográfica, y es justo a la derecha del punto donde aparece por primera vez material similar al de la planicie en el flanco izquierdo de SP (**Figura 4-14**). Es evidente que este estrecho estuvo en algún momento cubierto de material plástico: su superficie está cubierta por parches de material blanco similar al de la planicie, es el punto donde los glaciares a ambos lados de la cordillera se encuentran mas cerca y es además el punto más bajo de toda la cordillera. Esto apunta a que este estrecho es la única conexión entre la planicie central y las zonas más occidentales en esta región, ya que más al sur la unidad South Hillary Montes vuelven a

bloquear el paso. El material plástico al occidente parece estar actualmente desconectado de la planicie por este camino, esto es una evidencia de lo que parece una regresión de los hielos de la planicie.

Figura 4-14: Principal geoforma de la unidad Transitional hills (TH). Se muestra el estrecho que separa ambas cordilleras y también ambos lugares con material plástico. Su alto albedo parece indicar que en algún momento fue invadido por el material plástico. HM: Hillary montes, TL: Transmons lands, SHM: South Hillary montes.

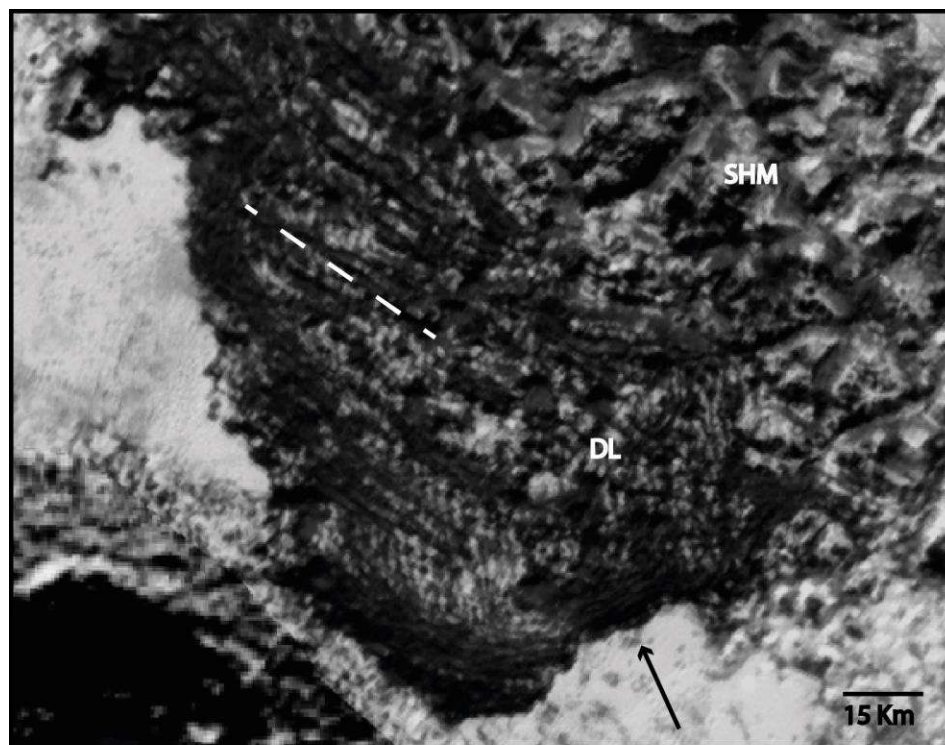


Dark lands (DL): Esta unidad es la más contrastante de todo Sputnik Planitia, su topografía es muy plana, pero su albedo y textura son muy diferentes a las demás unidades. La unidad se conforma por dos zonas separadas por TH, pero sus características son tan similares que se decidió colocarlas en una misma unidad.

Su mayor particularidad es su bajo albedo, el cual es el producto de un material completamente oscuro. Este material parece diferente al de las regiones cubiertas por *tholins* de las cordilleras, porque su color es más oscuro en comparación, y su reflexión de luz es completamente diferente.

Los dos sectores que forma esta unidad poseen en su interior una serie de lineamientos alargados y paralelos unos con otros. Estos son más notorios en la estructura del sur, en donde siguen el contorno general de la geoforma (**Figura 4-15**). La forma en que cambian de rumbo los lineamientos parece indicar que son fracturas producto de algún esfuerzo compresivo, que, junto al achatamiento de la unidad hacia el suroeste, señala un empuje proveniente de la unidad South Hillary montes sobre esta unidad.

Figura 4-15: Principal geoforma de la unidad Dark lands (DL). La imagen muestra el fragmento sur de DL, la línea blanca sigue el trazo de uno de los lineamientos superiores, la flecha señala el lugar donde los lineamientos siguen la forma de la estructura. SHM: South Hillary montes.

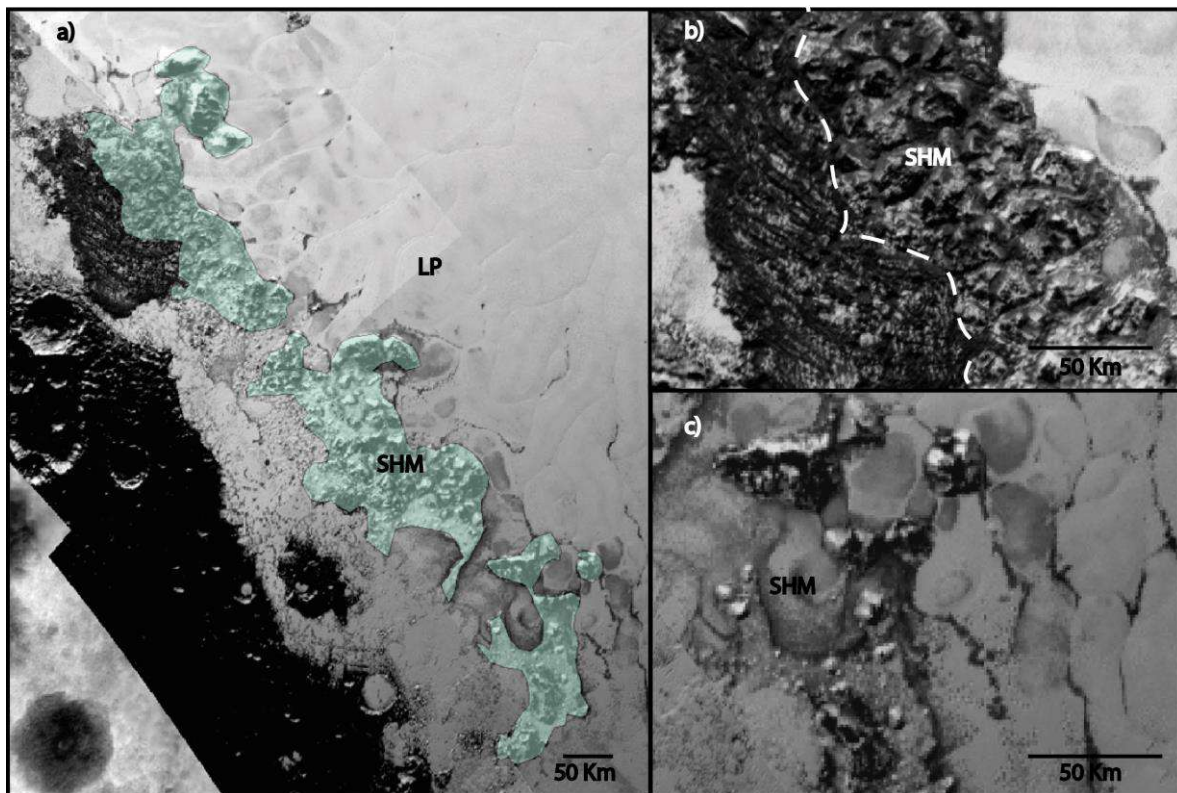


South hillary montes (SHM): Esta unidad es la continuación al sur de la cordillera. Luego de la zona baja ocupada por TH, vuelve a levantarse por encima de los terrenos de la planicie. Aparte de los bloques del norte, su altura es un menor a la otra sección de la

cordillera. Sus características son prácticamente iguales a HM, solo cambia la morfología general de cadena, esta sección es mucho más delgada y alargada, recorriendo más de 600 km en dirección NW-SE (**Figura 4-16, a**). La cordillera es invadida en varios puntos por el material de la planicie, a medida que recorre hacia el sur las incursiones son más y de mayor área, provocando que en el sur la cordillera termine como una serie de montañas aisladas unas de otras (**Figura 4-16, c**).

El fragmento más norte está en contacto directo con DL, las dos zonas limitan de manera cambiante (**Figura 4-16, b**), en lo que es un claro contacto discontinuo. Se cree que SHM está generando un empuje sobre DL que provoca su deformación, en un proceso de compresión que ocurriría de manera muy similar entre HM y la gran fosa.

Figura 4-16: Principales geoformas de la unidad South Hillary montes (SHM). a) Extensión completa de SHM, b) contacto sinuoso entre DL y SHM, c) Parte sur de SHM, los bloques están aislados por material plástico.



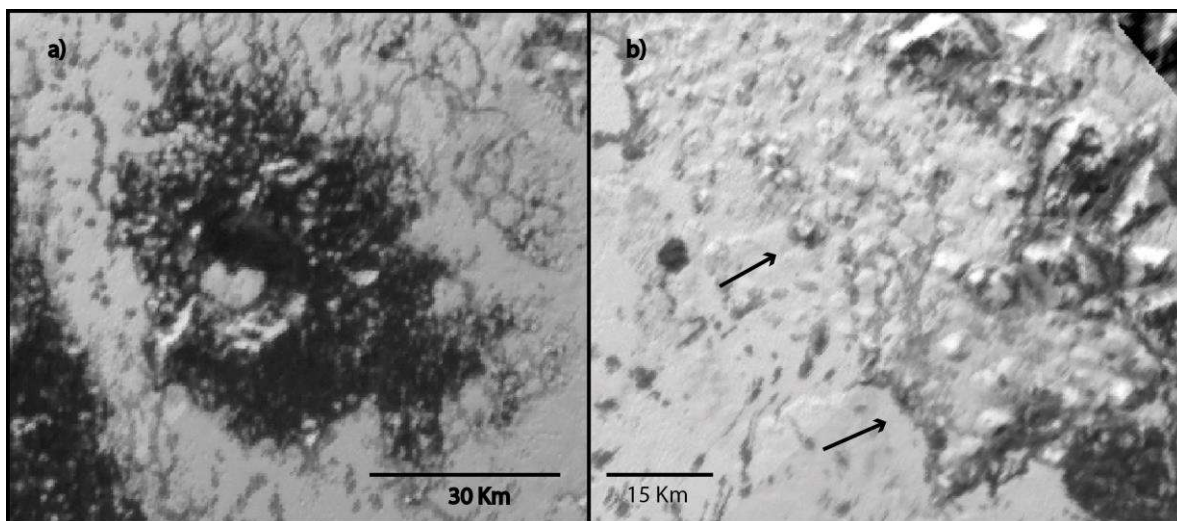
Esta cadena se encuentra compuesta por bloques similares a los de la sección norte, sus formas son un poco irregulares, pero siguen teniendo fuertes pendientes rodeando una meseta alta. Nuevamente las zonas iluminadas tienen un albedo más alto. El par de bloques

más al norte son los más altos de esta cordillera, su altura es apenas menor a la de la montaña aislada justo al norte (**Figura 4-13**), y de manera similar, están separados de la secuencia principalmente por un pequeño puente de colinas.

Hacia el oeste de esta cordillera se encuentra una región llena del material de la planicie, contrastando con la parte norte, en donde no aparecían hielos de ese estilo, a excepción del lago gélido entre las dos partes de la fosa.

Transmons lands (TL): Esta es la primera unidad descrita que está compuesta por material plástico. Esta definición se le da a la sustancia de textura lisa, muy baja resistencia y albedo muy alto que compone la mayoría de Sputnik Planitia. Esta unidad recorre el borde izquierdo de SP de norte a sur y de manera paralela a SHM, hacia el este se conecta intermitentemente con la planicie, y en el sur, ya sin SHM, se abre directamente hacia SP.

Figura 4-17: Principales geoformas de la unidad Transmons lands (TL). a) Fragmento del terreno Cthulhu Regio embebido en el material de TL, b) Estribaciones de la cordillera cubiertas por material plástico.



Se diferencia de la planicie por no poseer los patrones celulares que tanto caracteriza a esa unidad, su textura es muy lisa, más en las regiones aledañas a SHM se convierte en moteada, de forma similar a TH. Es posible asumir que el material plástico cubre las estribaciones de la cordillera en estas locaciones (**Figura 4-17, b**), el mismo patrón se observa al mirar en detalle las interrupciones que aíslan bloques de la cordillera.

Dentro de TL se observó embebido un pequeño montículo del terreno CR (**Figura 4-17, a**), el material no solo es más oscuro, sino que incluso posee un cráter de gran tamaño en su

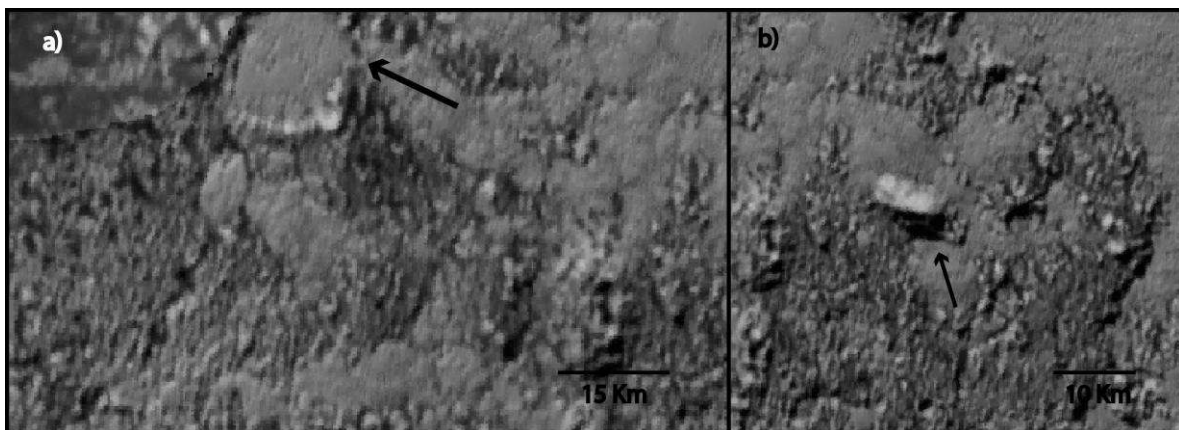
centro, una característica que no se presenta en ninguna otra unidad de SP. Hacia el norte se encontró otro cráter pequeño y casi totalmente cubierto por el material de TL. En los alrededores de este pedazo de CR se ven unas líneas y pequeños territorios de coloración oscura, esto es un fuerte indicio de que subyacente a TL se extiende Cthulhu Regio, tal vez como basamento de todo SP.

4.2.2 Zona sur

Las unidades de este grupo son las más afectadas por la distorsión focal del instrumento, por lo que se describirán brevemente de la mejor manera posible. SP como terreno tiene hacia el suroeste una continuación en forma de apéndice (**Figura 4-8**). Esta cuña se extiende brevemente hacia el sur, en donde Sputnik Planitia finalmente acaba, y da paso a los relieves más altos del terreno Southern Terra.

Invaded lands (IL): Esta unidad se encuentra en las extensiones finales de SP hacia el sur, conforma la pequeña saliente del terreno en forma de cuña (**Figura 4-8**), llegando hasta una latitud de 10° S. Esta zona resulta ser el mayor ejemplo de los procesos de regresión de SP desde CR, su totalidad está caracterizada por la textura moteada y el albedo cambiante de las zonas invadidas descritas en otras unidades (**Figura 4-18, a**).

Figura 4-18: Principales geoformas de la unidad Invaded lands (IL). a) Textura moteada de IL, la flecha señala el cráter totalmente cubierto por material plástico, b) Se señala un bloque que se encuentran en la mitad de esta unidad.

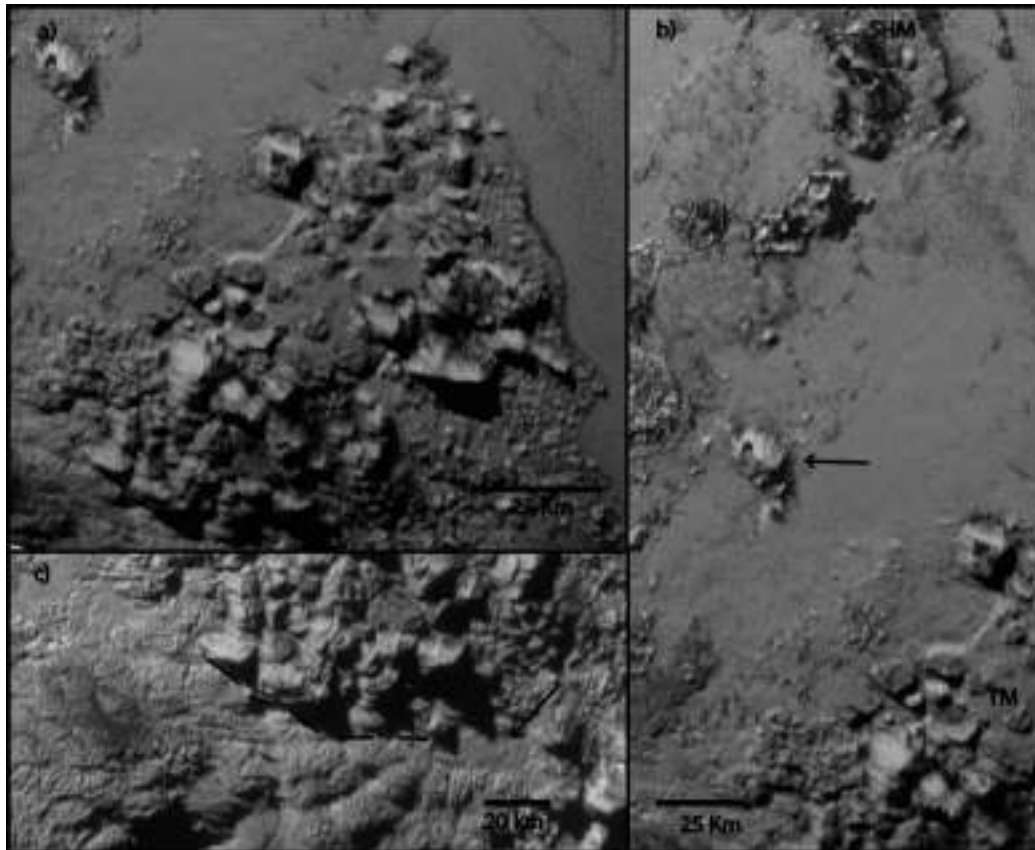


En la unidad se observó un cráter muy definido y parcialmente cubierto, otras posibles estructuras de impacto son visibles, pero actualmente están tan cubiertas de material

plástico que su identificación exacta se hace difícil. La unidad cambia hacia CR de manera progresiva, el albedo disminuye constantemente hasta volverse casi cero en el terreno hacia el norte. Algunos bloques angulares se encuentran cerca del límite de esta unidad, incluso se reconoció uno de ellos dentro del terreno moteado (**Figura 4-18, b**). La cadena montañosa más cercana es Tenzing montes al sur, de manera que su formación seguramente está asociada a ellos.

Tenzing montes (TM): Esta unidad es la última de las tres cadenas montañosas compuestas por bloques angulares, sus características son sumamente similares a las de Hillary montes, pero lamentablemente la alta distorsión en esta zona no permitió medir de manera correcta las altitudes de sus picos.

Figura 4-19: Principales geoformas de la unidad Tenzing montes (TM). a) Forma semi-rectangular de la cadena montañosa TM, b) Se señala el gran bloque ubicado a mitad de camino entre SHM y TM, c) Se dibuja el contacto entre TM y el terreno Southern Terra, la flecha señala un pequeño reservorio de material gélido.



Los bloques se agrupan en una forma semi-rectangular (**Figura 4-19, a**), no posee una amplia extensión longitudinal como las demás cordilleras. Hacia el centro de la masa de montañas ocurre un claro retroceso del material plástico (**Figura 4-19, a**), está antigua invasión casi dividía la unidad en dos, pero actualmente los bordes de toda la geoforma se encuentran por encima del nivel de la planicie. Un par de bloques se ubican aislados de la cadena principal hacia el norte (**Figura 4-19, b**), están prácticamente a mitad de camino entre Tenzing montes y SHM, este par de montañas podrían ser la evidencia de una génesis similar para todas las cordilleras.

Hacia el sur, TM está en contacto directo con el supuesto criovolcán de Southern terra. En ciertas partes dentro del contacto se observaron pequeños reservorios de material plástico entre ambas unidades, mientras que en otras el contacto es directo y abrupto (**Figura 4-19, c**). Es poco probable que estos reservorios hayan llegado allí producto de una invasión desde la planicie, por lo cual aquí se interpretó que TM se acercó progresivamente al terreno ST a través de material plástico, hasta que este fue eventualmente consumido en el proceso de acreción de las unidades resistentes, los pequeños reservorios que aún se mantienen estarían indicando que el proceso no es muy antiguo.

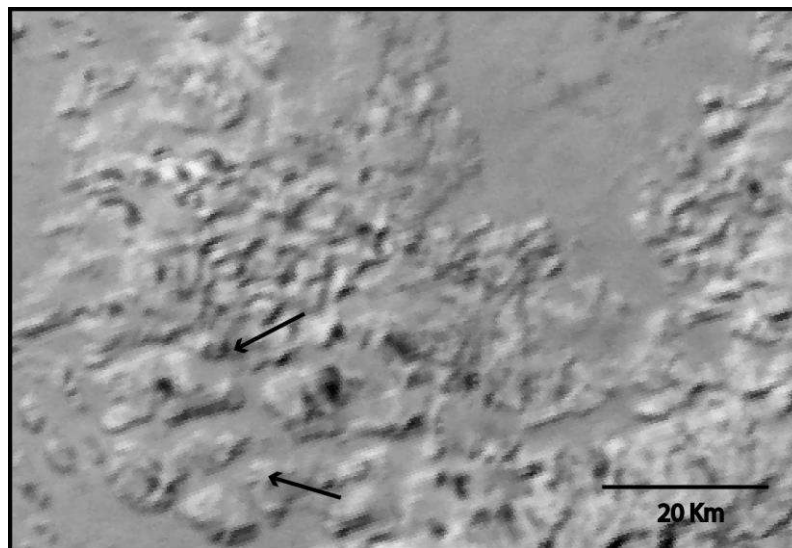
4.2.3 Margen Este

A diferencia del borde occidental de SP, esta región es poco variada en cuanto a tipos de superficie, y las pocas que pudieron ser diferenciadas no conllevan procesos geológicos tan complejos como en el otro margen. Se definieron tres unidades en esta región, siendo todas ellas en realidad muy similares.

Sputnik highlands foothills (SHF): Como su nombre lo indica, esta es la unidad más al este de SP, y se encuentra en la vecindad de Sputnik Highlands. De manera similar a VTF, esta es una zona de pendientes intermedias que progresivamente da paso al terreno Sputnik Highlands. Su albedo es muy alto, similar a la planicie, lo que indica que sus componentes son muy similares, la textura es variada, en unas zonas es tan plana como en SP, pero en otras presenta la irregularidad característica de SH, aunque a una menor escala. La topografía de la zona es más alta que la de la planicie, pequeñas colinas con escarpes muy fuertes dominan los altos topográficos, pero de nuevo, sin llegar a la magnitud de los profundos pozos de SH (**Figura 4-20**).

El que esta unidad represente una etapa transicional entre los terrenos SP y SH también es evidente en los amplios lagos gélidos a través de ella, los cuales son prácticamente iguales a los presentes en SH. Más a diferencia de ese terreno, estos reservorios están en contacto directo con la planicie. Uno de ellos fue analizado a profundidad en la sección de SH.

Figura 4-20: Principal geoforma de la unidad Sputnik highlands foothills (SHF). Se muestra el relieve característico de la unidad SHF, se señalan las numerosas conexiones entre los lagos gélidos y SP.

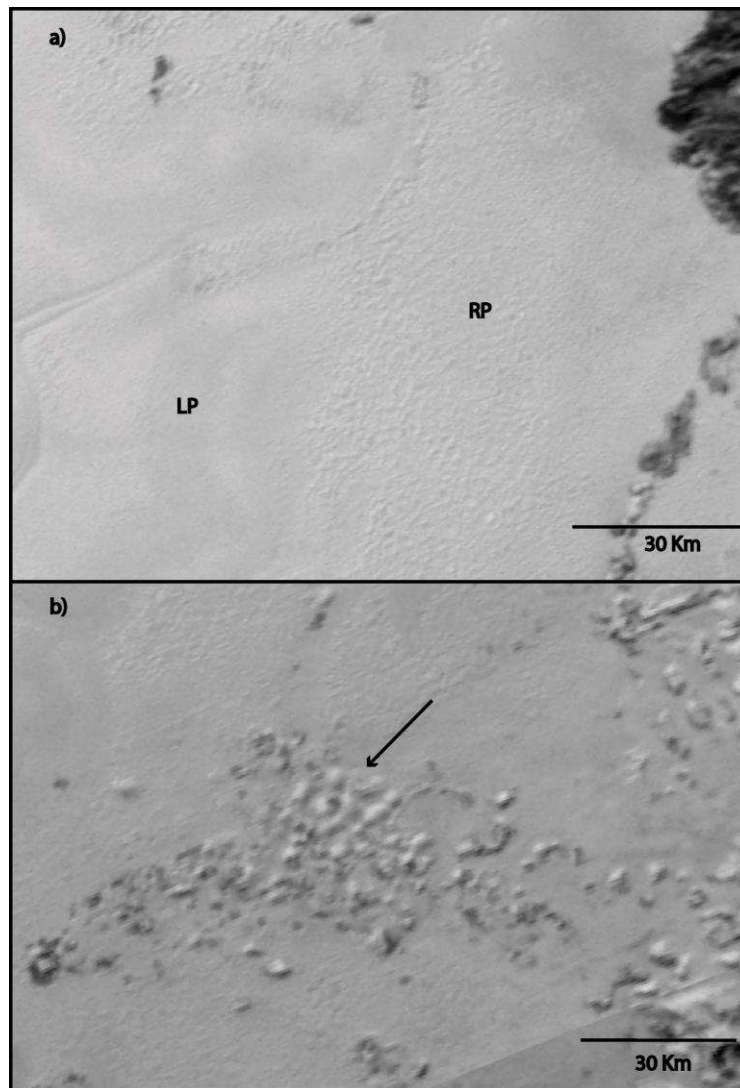


Rough planitia (RP): Esta unidad cubre una buena parte de la zona derecha de la planicie, se extiende de manera irregular en dirección N-S, por alrededor de 620 km. Sus características son prácticamente iguales a las de la planicie: alto albedo, bajo relieve y consistencia, pero se diferencia de manera ligera en la textura. En esta unidad la superficie tiene una apariencia levemente corrugada (**Figura 4-21, a**), contrastando con la planicie central, en donde la superficie es plana y libre de imperfectos. Estas rugosidades son inseparables del ruido de fondo en el DEM, de manera que es posible afirmar que las variaciones de altura son imperceptibles a esta escala. Aun así, son lo suficientemente gruesas y continuas para ser detectadas en los mosaicos LD.

Es inevitable relacionar estas rugosidades con las colinas intermedias de SHF y las posteriores crestas y pozos profundos de SH. Todas estas geoformas parecen seguir una secuencia continua con relieves cada vez más fuertes al dirigirse hacia el oeste. La anterior comparación es coherente con lo establecido por J M Moore et al., 2015, que identifica a SH como una zona donde la volatilización de N_2 y CH_4 ha generado los profundos pozos.

Este proceso naturalmente debe ocurrir de forma paulatina, de manera que los diferentes grados de rugosidad en las unidades puede estar relacionado con distintos grados de volatilización.

Figura 4-21: Principales geoformas de la unidad Rough planitia (RP). a) Comparación entre la rugosidad de Ligth planitia (LP) con Rough planitia, la textura cambia aunque sea poco perceptible, b) Se señalan los pequeños bloques que generan el escaso relieve de RP.



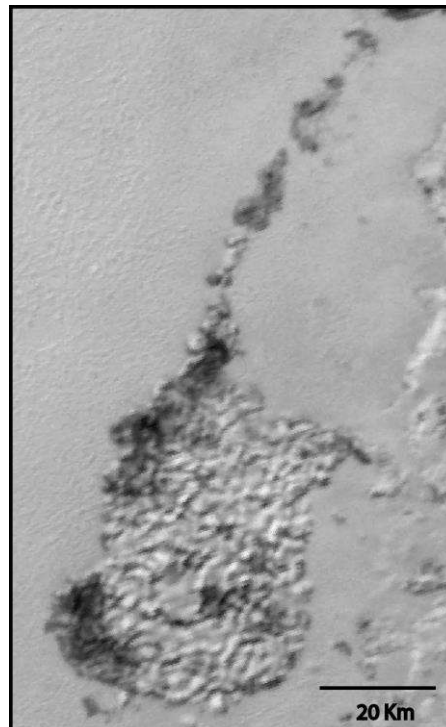
En su extensión fue posible observar ciertos accidentes topográficos de poca envergadura, algunos de ellos están agrupados, y poseen variaciones en la tonalidad hasta formar zonas muy oscuras (**Figura 4-21, b**). Estos pequeños montículos se encuentran esparcidos erráticamente a través de la unidad, y a diferencia de en la planicie central, no se encuentran

patrones celulares asociados a ellos. Los patrones celulares comunes hacia el oeste dejan de presentarse tan pronto aparecen las zonas de disolución, esto parece apuntar a una relación directa entre el grado de disolución y los patrones celulares.

Inner planitia block (IPB): Esta unidad es una pequeña geoforma que se encuentra dentro de RP, parece estar conformada por estructuras similares a los montículos de la planicie, como si se hubieran agrupado unos con otros (**Figura 4-22**). La geoforma se eleva un poco sobre la planicie y parece tener unos bordes definidos. en su flanco izquierdo se extiende una banda de material oscuro que recorre la geoforma de norte a sur.

No es claro cómo esta unidad pudo haberse formado y llegado a esta posición, pero parece una aglomeración de pequeños bloques. La geoforma tiene cierta semejanza con los terrenos más bajos de las cordilleras occidentales, por lo cual se estima que su origen podría ser similar.

Figura 4-22: Geometría de la unidad Inner Planitia block (IPB). En la imagen se muestra el bloque anómalo dentro de la planicie que conforma la unidad IPB.



4.2.4 Planicie central

Las unidades en esta región son las que dan el nombre de Sputnik Planitia al terreno, todas ellas presentan una topografía suave y con pocos accidentes geográficos a gran escala, y hasta cierto punto pueden ser consideradas planas. Geográficamente se encuentran en medio de las demás unidades, cubren más del 80% del área total de SP, y además se extienden desde el punto más norte hasta donde el terreno desaparece en el sur.

Dark planitia (DP): Conforman toda la punta norte de SP. Esta unidad contiene las geoformas que más llamaron la atención al empezar a realizar este estudio, que son las supuestas estructuras de flujo (**Figura 4-23, a**). Esta unidad comparte características morfológicas y ópticas con las demás zonas de la planicie central: su topografía es baja, posee pequeñas pendientes, la textura es en general lisa, y contiene los patrones celulares (**Figura 4-23, b**) que hacen tan características estas unidades.

Patrones celulares es la denominación que se le ha dado a los arreglos poligonales que recorren y se esparcen por SP (Stern et al., 2015). Estos intrincados mosaicos se componen de células con formas pentagonales, hexagonales y con geometrías irregulares. Muchas de ellos se interconectan en sus vértices, desde donde parten otras células en todas direcciones y con tamaños muy variados, algunas con 7 km de diámetro y otros llegan hasta los 40 km. Los límites de cada polígono pueden ser líneas rectas o curvas, aunque estas últimas no llegan a curvarse mucho. Estos límites geométricos permiten que los polígonos celulares formen estructuras más grandes en forma de mosaicos, los cuales se distorsionan y cambian en tamaño dependiendo de las células que los componen.

Los límites de cada polígono fueron vistos en detalle en los mosaicos HD. Aunque las imágenes de alta definición no cubren específicamente la unidad DP, por lo observado en los otros paquetes de imágenes es posible que los patrones celulares de las demás formaciones sean similares a los de Dark planitia, de modo que se tomaron las morfologías de los mosaicos HD como representativas. Se encontró que los límites de las células están constituidos por unas estructuras complejas: cada límite consta de una depresión rodeada por dos paredes más altas, y dentro de la zona baja puede o no encontrarse una cresta, esta elevación central parece diferir en tamaño para cada depresión, y también varía de tamaño lateralmente sobre la geoforma (**Figura 4-23, c**). Estas estructuras parecen jugar un papel importante en los patrones celulares, de modo que se les llamarán “Crestas poligonales”. Otro aspecto importante que se observó sobre las crestas poligonales, es que sobre ellas y en las coyunturas con otras crestas aparecen bloques de diferentes tamaños

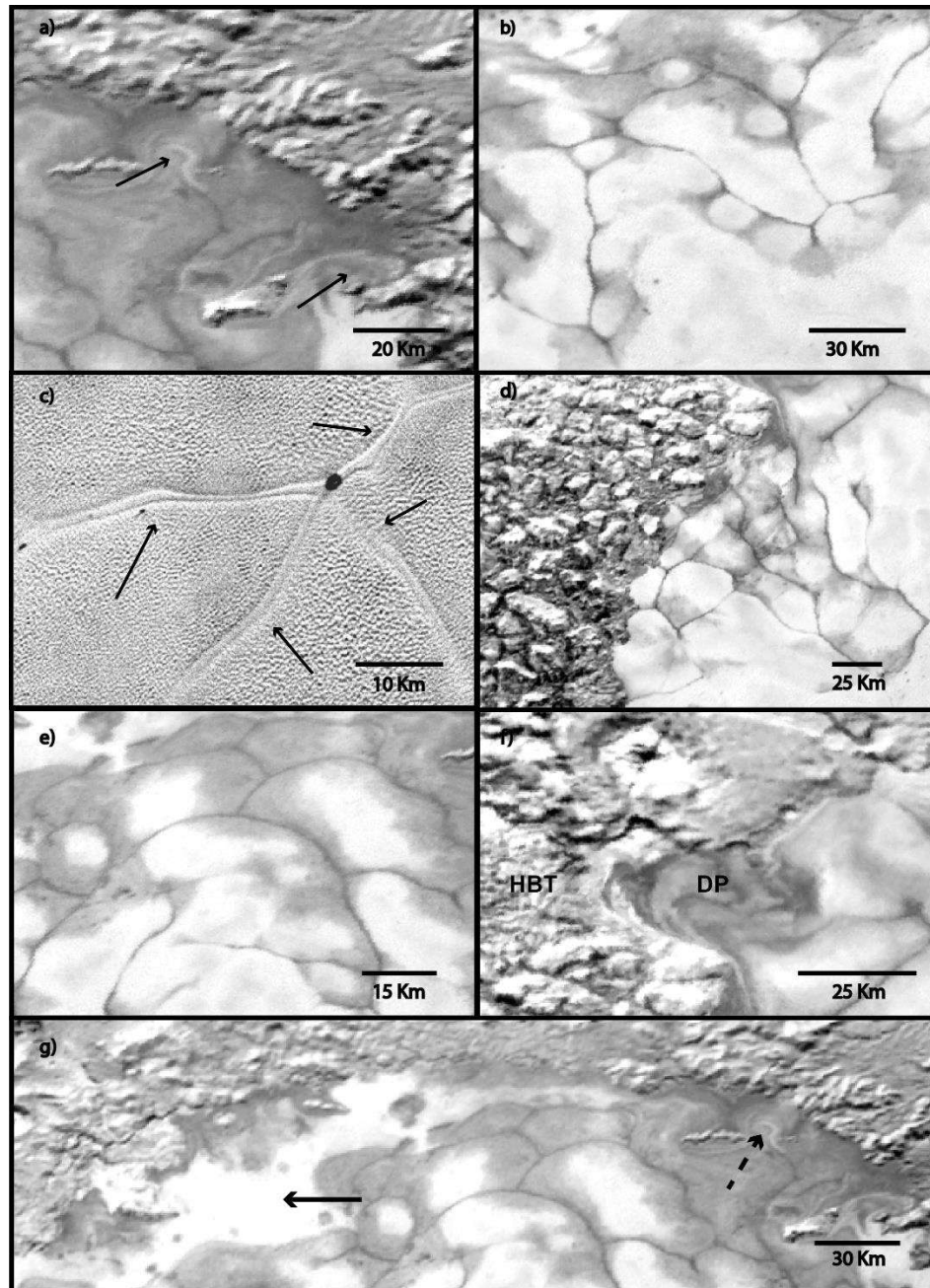
(Figura 4-24, f). En el mosaico LD no es posible observar ninguno de ellos en las crestas poligonales de DP, pero dado que algunos muy pequeños fueron detectados en los mosaicos HD, es posible que la resolución espacial para esta unidad no permita su detección, de manera que no se puede descartar su presencia. Las crestas poligonales de DP tienen una particularidad, son muy oscuras en comparación con las de otras unidades, esto marca los límites de las células más claramente. Lamentablemente la baja resolución de los datos no permitió establecer si existe una diferencia morfológica en estas crestas además de su color.

Una gran cantidad de estos patrones celulares se agrupa al oeste, en contacto con Hillary montes (Figura 4-23, d), las crestas poligonales se intersectan perpendicularmente contra los bloques angulares de HM, y hacia el norte el material oscuro se acumula contra la cordillera. Hacia el norte, los patrones celulares se curvan y diseminan hasta desaparecer y dar paso a dos regiones totalmente opuestas, hacia el occidente se extiende una región de muy alto albedo, mientras que hacia el este da paso a unas estructuras contorneadas de bajo albedo.

El albedo es precisamente la principal diferencia de esta unidad con el resto de la planicie central, DP posee una mezcla de materiales claros y oscuros. Algunas partes de la unidad muestran el alto albedo característico de la planicie central, mientras que otras son de una tonalidad oscura, ambos tipos de material tienen contactos sinuosos entre sí, sin mezclarse de manera heterogénea. Todas las zonas de bajo albedo están asociadas a las crestas, se determinó que este material se extiende en todas direcciones desde las crestas poligonales, ya que estas corresponden a los puntos medios de su dispersión (Figura 4-23, e). De manera similar, todas las zonas claras están rodeadas por material oscuro, excepto hacia el sur, en donde las crestas pierden esta coloración. Lo anterior parece indicar que el material oscuro proviene de las crestas, asociándolo a lo visto en otros terrenos, este material de bajo albedo podrían ser hielos ricos en *tholins*.

Antes de que SP acabe hacia el norte, los patrones celulares desaparecen y dan paso a unas estructuras diferentes (Figura 4-23, g). La región de muy alto albedo hacia el oeste es similar al resto de la planicie, su textura es bastante homogénea y no se observan imperfecciones en su superficie. Por otro lado, las regiones oscuras al este y oeste son diferentes a las que se encuentran más adentro de SP, en estas se observan unas estructuras contorneadas y retorcidas que se aglomeran hacia los bordes de SP, se cree que estas estructuras de flujo muestran el movimiento de los glaciares hacia las zonas en

Figura 4-23: Principales geoformas de la unidad Dark planitia (DP). a) Patrones de flujo, son estructuras que representan la dirección de movimiento del glaciar, b) Típicos patrones celular de la planicie, c) “Crestas” que limitan los polígonos, se señalan las cuatro dorsales que convergen en un punto, d) Patrones celulares asociados estrechamente con Hillary montes, e) Zonas claras de las células rodeadas de zonas oscuras, f) Invasión de Dark Planitia sobre la gran trinchera, se observan estructuras del flujo dentro del glaciar, e) Limite norte de SP, la flecha continua señala la zona de alto albedo, la flecha discontinua señala los patrones de flujo en la zona de bajo albedo.



donde SP encuentra sus límites. Las estructuras hacia el oeste se desparraman de manera concordante con el movimiento de la lengua hacia la gran fosa (**Figura 4-23, f**), y hacia el este los patrones de flujo se muestran erráticos tras no poder seguir avanzando sobre unas colinas que les impiden el paso (**Figura 4-23, g**).

En un principio se pensó que estas estructuras eran el resultado de flujos continuos de criomagma, pero la evidencia mostró que su comportamiento es más similar al del movimiento de las lenguas glaciares terrestres. Cabe destacar que estas estructuras en nuestro planeta no presentan patrones de flujo tan retorcidos y deformados como en SP, por tal razón los glaciares en Plutón deben ser considerablemente más fluidos que en la Tierra, esto seguramente está asociado a la baja viscosidad del N_2 (Trowbridge et al., 2016).

Hacia el norte, SP limita con el terreno Voyager terra, a diferencia de sus límites en otras direcciones, este se caracteriza por sus bajas alturas y pendientes. Esta región es la más baja de SP después de la gran fosa, la planicie termina es una especie de depresión que se extiende de manera curva en sentido E-O. Pasando este bajo continúan unas tierras de baja altura en VT, estas bajas pendientes son probablemente continuas bajo el basamento de SP, de manera que hacia este extremo la planicie debe ser bastante somera.

Grey planitia (GP): Se localiza justo al sur de Dark planitia, la mayoría de sus propiedades son iguales a la unidad anterior: textura lisa, bajas topografías, poca a nula pendiente, pero un albedo mucho más bajo y más homogéneo la diferencia de la unidad al norte. Los patrones poligonales siguen presentes, pero con una tonalidad más clara (**Figura 4-24, c**).

La transición a esta unidad se da de una manera muy abrupta, la principal diferencia es el menor albedo, de modo que al dejar de aparecer el material oscuro terminara una unidad y empezara otra (**Figura 4-24, a**). Las últimas apariciones del material oscuro están relacionadas a las crestas poligonales: en algunos casos se da una pequeña zona de diseminación del material oscuro en formas cónicas similares a abanicos, en otras la cresta parece terminar abruptamente (**Figura 4-24, b**). Al observar en detalle se descubrió que las crestas poligonales no desaparecen, sino que cambian su tonalidad, tanto la depresión como la estructura elevada adquieren un albedo alto. Los patrones celulares continúan desde DP. Estas células son generalmente más grandes que las encontradas en DP (**Figura 4-24, a**).

Los mosaicos HD pasan directamente sobre esta unidad, de manera que fue posible analizarla en gran detalle. El primer descubrimiento que se hizo con estos mosaicos fue que la textura de la unidad y de toda la planicie central cambia drásticamente, a esta

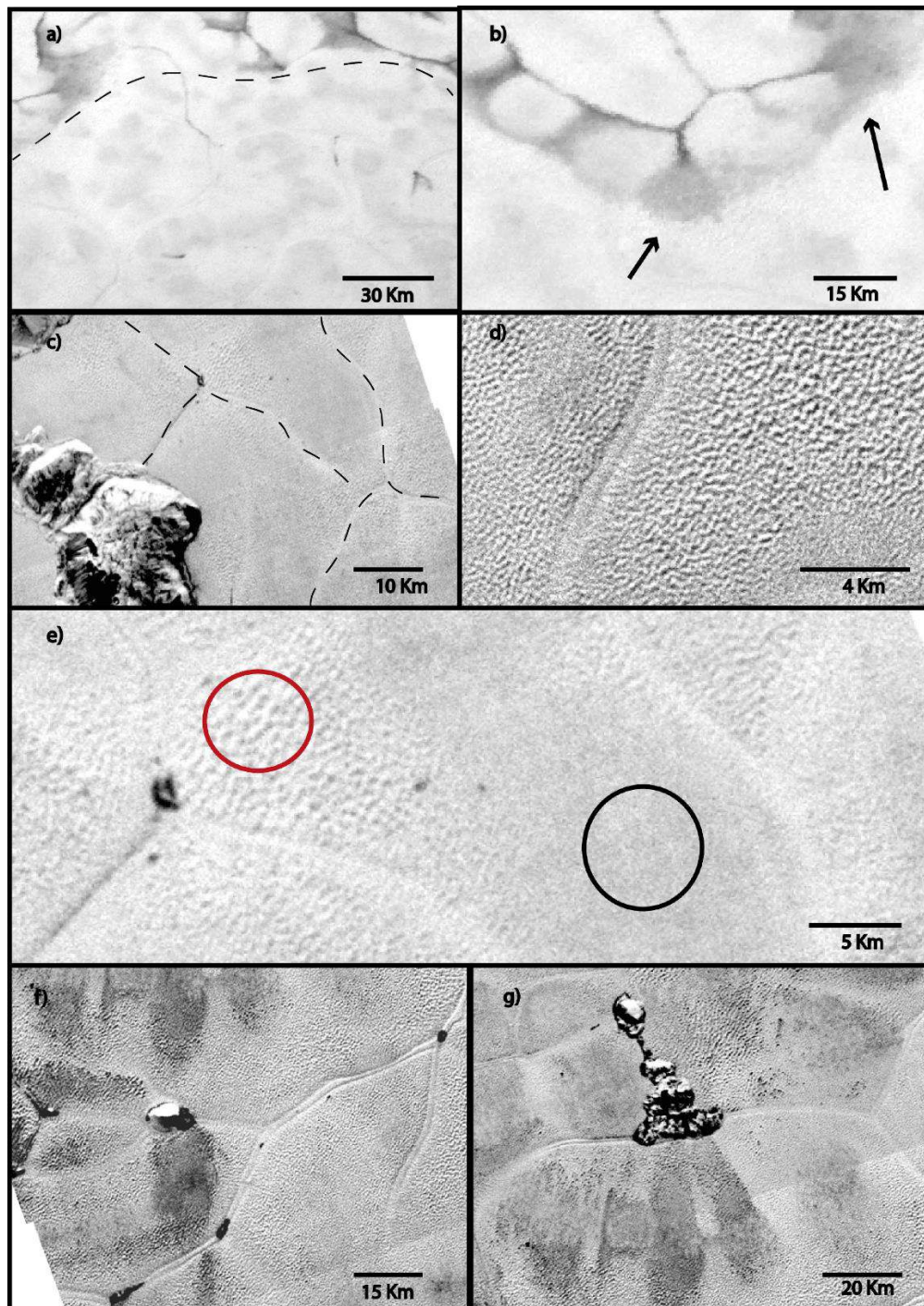
resolución todo aparece con una textura rugosa. Las zonas dentro de la célula se muestran llenas de pequeños agujeros unos junto a otros, los cuales no superan los 100 metros de diámetro y probablemente no tengan más que decenas de metros de profundidad (**Figura 4-24, d**), el que sean tan pequeños es la causa de que no puedan ser detectados ni en los mosaicos de menor resolución ni en el DEM. Esto cambia ligeramente la idea de que SP es una gran planicie, aunque en general sus pendientes son casi nulas, estos numerosos pozos deben dar al paisaje una sensación de irregularidad. Las geometrías internas de las células se asemejan a las dunas en un desierto, pero como dicho proceso eólico es imposible en Plutón (Young et al., 2018), la mejor explicación en un proceso de volatilización (Jeffrey M Moore et al., 2017).

Grey planitia se diferencia de la unidad más central por el albedo. El cambio en la reflectancia es muy leve, pero al observar con cuidado se encontró que en el interior de las células algunas regiones tienen una tonalidad gris, en esta ocasión los parches de mayor y menor albedo se mezclan de manera aleatoria y uniforme, esto produce un efecto contrario a DP, las crestas poligonales se ven más claras que las células. Los mosaicos HD resultaron perfectos para analizar este fenómeno, en ellos quedó claro que las diferencias se deben a un cambio textural y no composicional, casi todas las zonas de tonalidad gris contienen una menor cantidad de pozos, o si los hay, estos son de menores proporciones (**Figura 4-24, e**), esto probablemente indica que las células más oscuras son más recientes: al tener menor tiempo de exposición, menor será el grado de sublimación de su superficie.

Dentro de esta unidad aparecen los bloques angulares asociados a las crestas poligonales, estos son en su mayoría de tamaño pequeño. Como ya se mencionó, todos ellos están asociados a las divisiones entre polígonos, algunos ubicados sobre los vértices y otros tantos aparecen en la coyuntura de dos o más crestas (**Figura 4-24, f**). Muchos bloques están asociados a zonas de material oscuro, estas se concentran alrededor del bloque o esparcidas en alguna dirección, en este caso el cambio de tonalidad es debido a composición y no textura, es posible que se trate del mismo material que sale en las crestas poligonales de DP.

Una estructura llama mucho la atención en esta unidad, su textura es similar a la de los bloques angulares (**Figura 4-24, g**), pero su geometría es diferente y parece relacionar al material oscuro esparcido en la célula. Podría tratarse de un gran bloque que aleatoriamente apareció al tiempo que el material de bajo albedo. Siendo un caso tan extraño es difícil llegar a una conclusión de su formación.

Figura 4-24: Principales geoformas de la unidad Grey planitia (GP). a) Transición de Dark planitia a Grey Planitia, las crestas poligonales cambian su albedo, b) Se señalan las terminaciones del material oscuro al dispersarse sobre GP, c) Patrones celular en GP, d) Textura rugosa dentro de los polígonos de la planicie, e) El círculo rojo es una muestra de las zonas claras y con gran cantidad de pozos, el círculo negro es una muestra de las zonas más oscuras y libres de pozos, f) Bloques, todos asociados a las crestas, g) Bloque anómalo asociado a material oscuro.



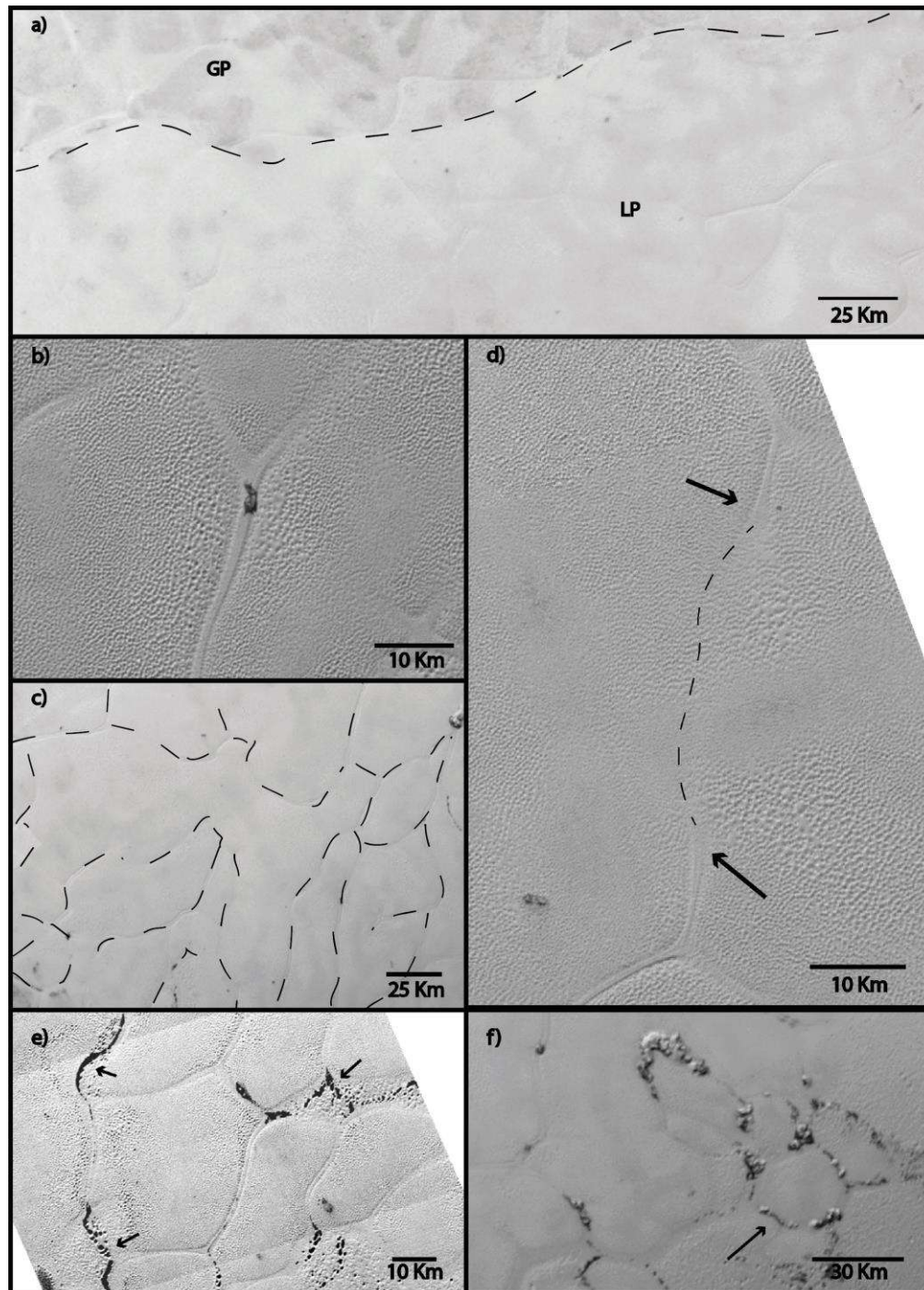
Light planitia (LP): Representa toda el área central del terreno, cubre más de 600 Km² y su forma es bastante irregular. Nuevamente se presentan las mismas propiedades fotogeológicas de las demás unidades en la planicie, y de la misma manera, su mayor diferencia con las otras unidades es su albedo (**Figura 4-25, a**). En este caso la reflectancia es muy alta, siendo la región más clara de todo Plutón sin ser efecto de la iluminación. Esta unidad es la más alta de toda la planicie, y lo es aún más hacia Hillary montes. El principio de la isostasia, en el cual un exceso de masa es compensado en profundidad para mantener el equilibrio hidrostático (Bowie, 1927), indicaría que SP es también más profunda en este lugar.

Light Planitia posee una textura lisa en los mosaicos LD, pero al ser observada en las fajas HD se observa un cambio similar a lo visto en GP. La textura en las imágenes de alta resolución es completamente rugosa, incluso mayor que en GP, los pozos son más abundantes que en la unidad al norte y se encuentran distribuidos de manera homogénea, algunas zonas con pozos menos desarrollados se encontraron esporádicamente (**Figura 4-25, b**). Teniendo en cuenta que en la unidad GP la ausencia de pozos provocaba las caídas en el albedo, es posible asumir que el mayor albedo de esta unidad es causa de la mayor evolución de los pozos en la planicie. El análisis de las dos unidades anteriores permitió saber que el albedo en la planicie es fuertemente dependiente del desarrollo y tamaño de los pozos de disolución, relacionándose con el efecto de rugosidad provocado al impactar la luz sobre una superficie irregular.

Los patrones celulares siguen siendo geoformas recurrentes en esta unidad, pero ocurre un cambio importante en su estructura, el mosaico de células se ensancha al empezar esta unidad, cada polígono es dos o tres veces más grande que aquellos en las demás unidades (**Figura 4-25, c**). Sus formas también cambian, muchas crestas poligonales se extienden longitudinalmente por varios kilómetros en dirección E-W, lo que provoca que los polígonos sean también más alargados. En las anteriores unidades son pocas las crestas que no son continuas; en LP este fenómeno se repite varias veces, las crestas poligonales se desvanecen paulatinamente en alguno de sus extremos, hasta que en cierto punto los polígonos que separaba se unen en uno solo.

Algunas de estas crestas parecen terminar abruptamente, pero al observar con cuidado se observaron estribaciones de su continuidad, al seguir su trayecto se encontró que eventualmente se unen con otras crestas poligonales aun reconocibles (**Figura 4-25, d**).

Figura 4-25: Principales geoformas de la unidad Light planitia (LP). a) Diferencia de albedo entre Grey planitia y Light planitia, b) Textura rugosa en LP, c) Células de grandes tamaños y formas alargadas, d) Se señalan los aparentes puntos terminales de dos crestas, la línea punteada señala el camino difuso por el que podrían juntarse, e) Se señalan las hondonadas que se forman en las dorsales de la parte sur de la unidad, f) Bloques siguiendo la forma de las dorsales y mostrando la deformación de la célula.



Hacia el sur de LP las crestas sufren un cambio drástico, donde deberían estar estos lineamientos aparecen pozos de gran tamaño y posiblemente bastante profundos. Estos grandes pozos se unen para formas largas hondonadas (**Figura 4-25, e**), los pozos en las regiones de las células cercanas a estos grandes agujeros son también más desarrollados que en el resto de su extensión. No está claro si estos grandes agujeros en la planicie son señal de un colapso interno. No hay razón para que los materiales de las crestas sufran una mayor volatilización, por lo que se especula que es una respuesta a un proceso endógeno, lamentablemente la naturaleza de este fenómeno no puede comprobarse con los datos actuales.

Los bloques siguen apareciendo en esta unidad asociados a las crestas, especialmente hacia el oeste. Hacia el occidente aparecen una cantidad considerable de pequeños bloques dentro de los patrones celulares. Estos se encuentran todos relativamente cerca a los bordes de las células, y donde son más abundantes no se observaron bloques dentro de las crestas. En el oriente se encontró una geoforma bastante particular, en un área no muy grande aparecen agrupados una gran cantidad de bloques de tamaños considerables, son tan abundantes que incluso llegan a delimitar perfectamente una de las células y remarcar las curvas y deformaciones de sus límites (**Figura 4-25, f**). Esta geoforma es una fuerte señal de que estos bloques están estrechamente relacionados con las crestas poligonales.

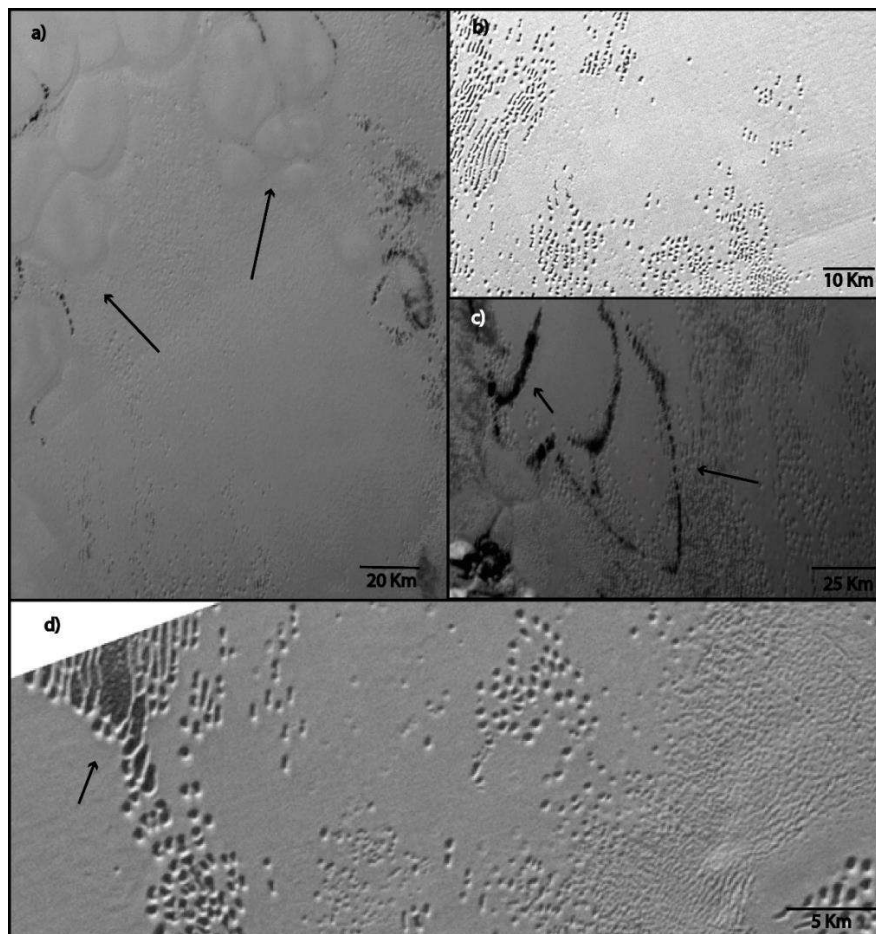
Pit lands (PL): Esta unidad cubre toda la zona sur de SP, y aunque sus propiedades son más similares a la planicie que a cualquier otra región, resulta considerablemente diferente de las unidades anteriores. Su baja topografía y alto albedo indican un material superficial plástico igualable con el resto de la planicie, por lo que su génesis debe ser hasta cierto punto conjunta con las demás unidades.

La primera característica que diferencia a PL es la total ausencia de patrones celulares en su extensión, las células y sus delimitantes desaparecen en su contacto con LP para dar paso a una llanura homogénea. La nueva superficie no posee barreras geomorfológicas de ningún tipo y se extiende hasta el límite sur de SP (**Figura 4-26, a**).

La textura varía entre rugosa y lisa (**Figura 4-26, b**), las partes rugosas se encuentran cubiertas por pozos de variados tamaños, la mayoría de ellos son apenas más grandes que sus homólogos en la planicie. Otros intermedios se ubican esporádicamente sobre el área, los más interesantes tienen las dimensiones de las hondonadas en LP, estos se encuentran concentrados hacia la parte sur de la unidad y se ubican uno tras de otro en una tendencia

sinusoidal, las geoformas que estas agrupaciones de pozos generan parecen remanentes muy deformados de patrones celulares (**Figura 4-26, d**). Las zonas con una textura lisa están completamente libres de irregularidades superficiales, estas tienden a ser las regiones más planas y lisas de todo Plutón. Algunos pozos incipientes parecen estar generándose en estas regiones, mas no afectan la tendencia general, el por qué estas zonas son más planas que la misma planicie aún no está claro.

Figura 4-26: Principales geoformas de la unidad Pit lands (PL). a) Se señalan las zonas en donde desaparecen los patrones celulares y empieza la planicie homogénea, b) contraste de textura, c) Hondonadas que se asemejan a las crestas al sur de LP, pero mucho más deformadas, d) Se señala una gran hondonada, es tan amplia que se logra ver una textura corrugada en su interior.



5. Análisis morfométricos

En esta sección se realizaron análisis morfométricos a partir de los datos de elevación disponibles, para todos ellos se utilizó el DEM corregido que, aunque presentaba grandes problemas, se le consiguió eliminar gran parte del ruido. Todos los parámetros realizados en esta sección fueron enfocados al estudio de la superficie y sus variaciones. Con base en el DEM corregido se obtuvieron la pendiente, el modelo de sombras y el aspecto del terreno. Se intentó medir otros parámetros como curvatura y direcciones de flujo, pero la calidad del DEM no permitió que de estos productos se obtuviera información valiosa, de manera que se decidió descartarlos.

5.1 Modelo digital de elevación

Las variaciones locales de altura han sido discutidas en la descripción de cada terreno y unidad, pero cierta información de utilidad fue obtenida analizando la tendencia general de la topografía, especialmente en Sputnik Planitia. En el DEM se presentan alturas positivas como negativas. A diferencia de la Tierra, en donde el nivel base cero corresponde al nivel del mar, el nivel base de Plutón se establece en un punto medio entre los puntos más bajos y altos (Jeffrey M. Moore et al., 2016).

Queda claro a primera vista que el nivel de altitud más frecuente de Plutón es entre los 1000 y 2000 metros de altura, que en la paleta de colores escogida correspondería las regiones marrones de la (**Figura 5-1**). Las zonas entre estos intervalos de altura son las más abundantes en todos los terrenos, a excepción de Sputnik Planitia, en donde la altura decrece entre 700 y 1500 metros.

Las zonas más altas están expresadas en color blanco en la (**Figura 5-1**), tres regiones de gran altura fueron identificadas en la zona de estudio. La primera de ellas está ubicada al sur de Cthulhu Regio, se muestra como una cadena alargada con una dirección N-S (**Figura 5-1, a**), sus picos más altos alcanzan 3700 metros sobre el nivel base, y la zona como tal

llega a tener 250 Km de espesor en su región más ancha. Su extensión hacia el sur no puede ser calculada, ya que se prolonga más allá de los datos disponibles, sin embargo, en lo que es visible se extiende por más de 700 Km. En las imágenes disponibles solo es observable en los datos de MVIC, en donde se detectó que tiene una forma similar a una cuchilla, con un alto albedo en sus puntas y cubierta de cráteres.

La segunda zona de gran altura se encuentra en Sputnik Highlands (**Figura 5-1, b**), sus crestas más altas alcanzan los 3000 metros sobre el nivel base, el terreno es bastante estrellado y cambia de altura rápidamente hacia los pozos de evaporación. Resulta interesante cómo este terreno se encuentra tan alto teniendo en cuenta su posible relación genética con Sputnik Planitia.

La última región de altura considerable son los cinco bloques ubicados a los extremos de Hillary montes y South Hillary montes (**Figura 5-1, c**), estas montañas superan los 3000 metros de altura, lo cual es bastante impresionante teniendo en cuenta que pertenecen a SP. Dado que estos bloques se encuentran sustentados en un medio viscoso, puede asumirse que sus raíces en profundidad son equivalentemente masivas, convirtiéndolos en los bloques más grandes de toda planicie. Todos ellos también tienen la particularidad de que algunas crestas poligonales se intersectan con ellos, estas relaciones indican que estos bloques se formaron de manera similar a los pequeños bloques repartidos por la planicie.

Fuera de Sputnik Planitia las zonas de baja altura están restringidas a los cráteres de gran tamaño, especialmente hacia el sur de Cthulhu Regio. El gran cráter deformado de CR (**Figura 4-4, d**) varía más de dos kilómetros desde su borde hasta la depresión central, sus dimensiones pueden estar distorsionadas por la iluminación, pero aun así, sus proporciones son bastante grandes. Aparte de los cráteres, las únicas geoformas con zonas bajas son *Virgil fossae* y *Duzumi fossae*, estos cañones inciden la corteza gélida hasta 2000 metros, lo que les da una dimensión de cerca del doble del *Gran Cañón del Colorado*. Los demás cañones de CR tienen configuraciones geométricas similares a estos dos, pero no llegan a ser tan profundos.

Sputnik Planitia es en general plana a excepción de las cadenas montañosas, pero al revisar con cuidado el DEM también se encontró que existen variaciones topográficas a gran escala. Toda la planicie tiene una progresiva y leve pérdida de altura desde la parte central hacia los bordes norte, este y sur. Este cambio de altitud ocurre con pendientes muy bajas, pero aun así perceptibles en el DEM (**Figura 5-1**).

Figura 5-1: Modelo digital de elevación (DEM) corregido de la zona de estudio. a) Cadena montañosa en Cthulhu Regio, b) Zonas altas en Sputnik Highlands, c) Bloques más altos de Hillary montes. Las flechas señalan el decrecimiento de altura desde el centro de Sputnik Planitia hacia los bordes. Se muestra el trazo del perfil 2.

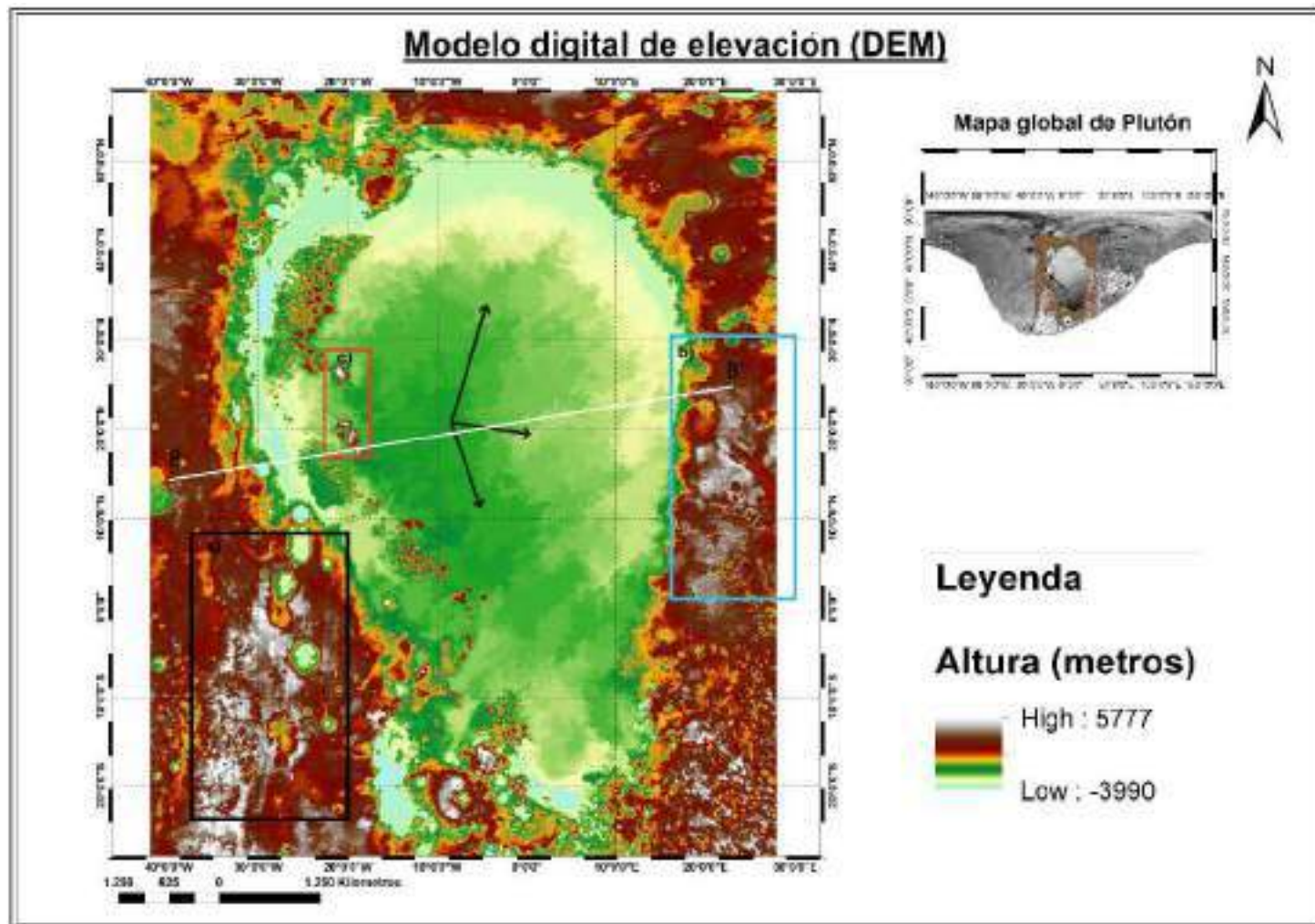
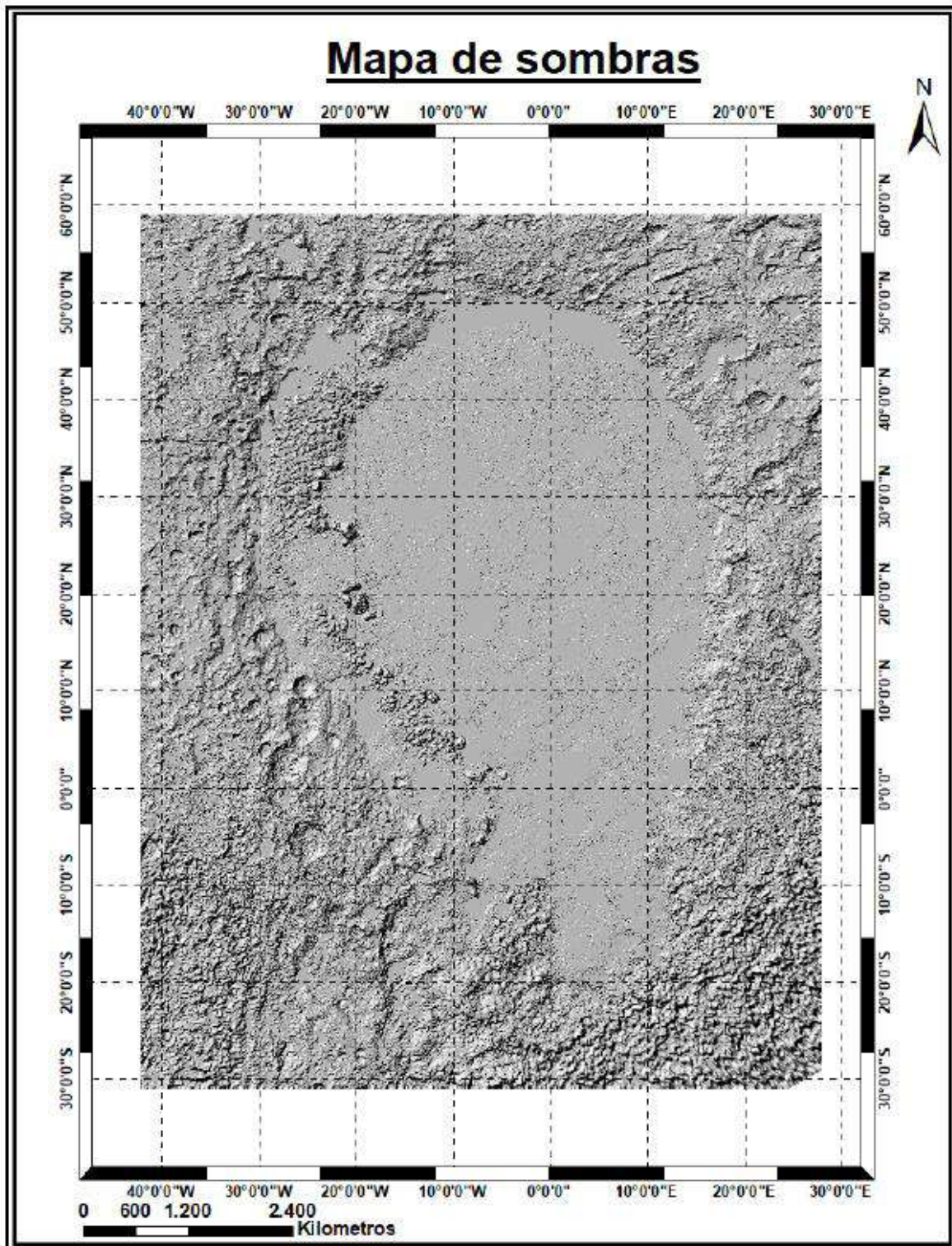


Figura 5-2: Mapa de sombras de la zona de estudio.



La parte más alta de la planicie se encuentra en contacto con Hillary montes, desde donde decrece hacia las demás direcciones, principalmente hacia el norte, llegando a su punto más bajo en el límite con Voyager Terra. En esta localización el material plástico de la planicie parece dirigirse hacia el norte sobre una superficie muy plana, de manera que los glaciares de N_2 y CH_4 se desplazan de manera lobular sobre los terrenos de Voyager Terra. Cabe resaltar que en el proceso del suavizado del DEM se perdió cierta información de los cambios de altura en SP, esto provocó que los cambios dentro de SP se observen abruptos, cuando probablemente no lo son.

Cabe resaltar la gran fosa dentro de SP, esta depresión en el margen occidental del terreno contiene las menores alturas de todo el hemisferio observado de Plutón. Es posible que Hillary montes represente una barrera geográfica que ha impedido el flujo de material plástico de la planicie a esta región, evitando así su relleno y nivelación con el resto de SP.

5.2 Modelo de sombras

Este modelo es una representación del relieve que resalta los accidentes topográficos (**Figura 5-2**), el mapa generado es una imagen en escala de grises que varía según una iluminación artificial y las sombras que produce, en este caso la posición del sol es al noroeste y con una elevación de 45° . Esta posición fue escogida ya que se considera da el mayor contraste posible entre geoformas (Flitter & Weckenbrock, n.d.). Adicionalmente, esta configuración asemeja la posición solar durante la toma de datos de New Horizons.

El modelo de sombras fue utilizado para complementar el análisis de geoformas tanto en las imágenes como en el DEM, de manera que la información extraída de este mapa ya ha sido mencionada en otras secciones.

5.3 Pendiente

La pendiente del terreno es un parámetro que permite conocer que tan rápido varía la altitud de una superficie de un punto a otro. La pendiente S es calculada con la siguiente ecuación:

$$S = \arctan \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

Este parámetro ayuda a identificar escarpes donde el cambio de altitud es casi instantáneo, o planicies en donde las variaciones de altura son casi nulas. Ambas situaciones se

presentan en Plutón, de modo que la pendiente resulto muy útil para definir estas geoformas.

El mapa de pendientes se realizó teniendo como base el DEM corregido, se utilizó un factor de escalamiento de 0,00028 para el eje z, este fue estimado teniendo en cuenta que en la proyección geográfica utilizada un grado equivale a 280 Km en el ecuador. Este parámetro es representado en grados, en donde cero es el valor de una superficie que no cambia su altura y noventa el de una superficie completamente vertical. En la **Figura 5-4** se observa la pendiente de la zona de estudio, el color verde está en zonas de pendiente baja y el rojo en los de mayor pendiente.

Todos los terrenos a excepción de Sputnik Planitia muestran una gran variedad de pendientes, cabe resaltar que hacia el sur de la zona de estudio las pendientes tienden a ser más altas, pero nuevamente esto resulta ser un efecto de la distorsión asociada al DEM. En el terreno Voyager Terra sobresalen unas altas pendientes, mayores de los 75°, todas ellas se encuentran asociadas a los bordes de grandes cráteres; esta relación es lógica debido a que impactos más grandes generaran taludes de mayor magnitud.

En Sputnik Planitia las pendientes son en general menores a los 15°, sus pequeñas y lentas variaciones en altura son las que le atribuyen a esta zona el nombre de planicie, estas zonas expresadas en color verde delimitan casi perfectamente los lugares donde predomina en material plástico, cubriendo la planicie central y las unidades al este (**Figura 5-3**). Las bajas pendientes también son características dentro de la gran fosa y sus alrededores, de manera que la transición a esta profunda geoforma es más bien gradual desde ambos lados, la fosa también parece tener un fondo relativamente plano, este resulta más ancho hacia el norte, mientras que hacia el sur se adelgaza hasta desaparecer.

Algunas zonas planas fueron observadas en los terrenos Transitional Terra y Cthulhu Regio, generalmente concentradas en los altos topográficos. Esto indica que dichos terrenos fueron probablemente levantados de manera homogénea y en grandes bloques, resultando en zonas extensas y homogéneamente altas, similares a mesetas.

Figura 5-3: Perfil de elevación de Sputnik Planitia. Este perfil de elevación atraviesa de lado a lado Sputnik Planitia y sus terrenos circundantes, se observa la baja altitud de toda planicie a excepción de la cadena montañosa, y como existe una leve caída en la elevación de la planicie de oeste a este.

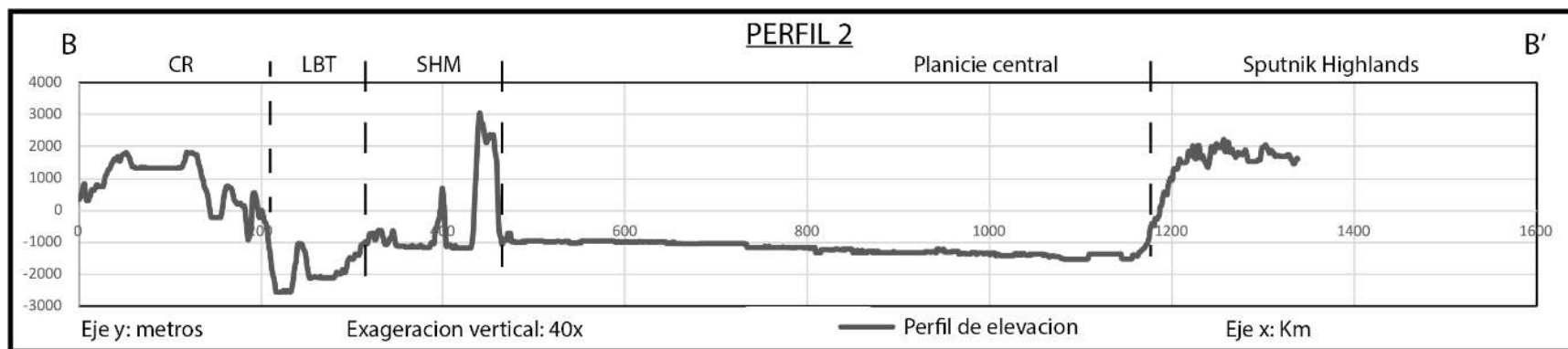
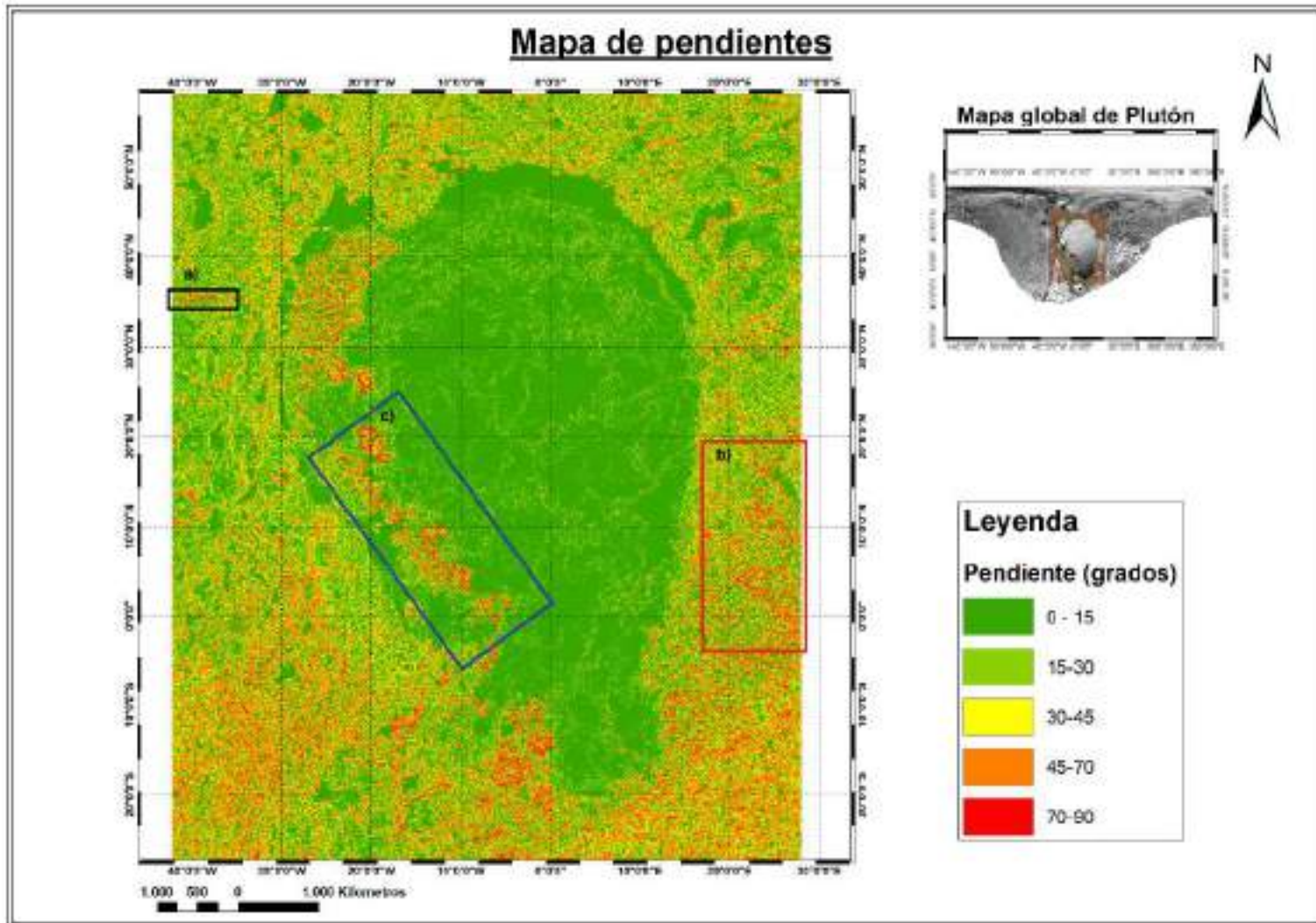


Figura 5-4: Mapa de pendientes de la zona de estudio. a) Altas pendientes en *Duzumi fossae*, b) Altas pendientes en Sputnik Highlands, c) Altas pendientes rodeando las cimas planas de los bloques en Hillary montes.



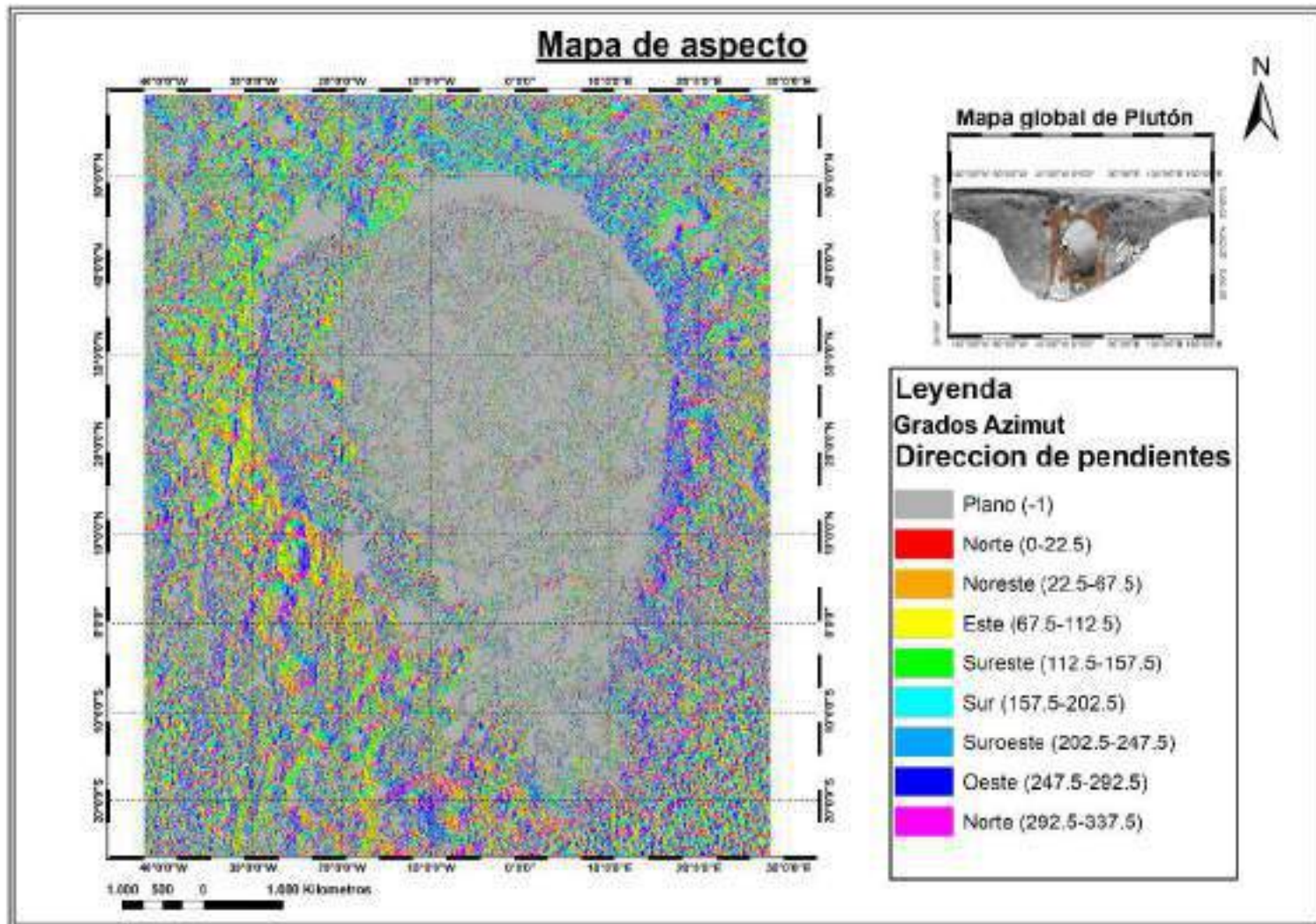
Las zonas con pendientes mayores a 75° son todas diferentes en origen, ya se nombraron aquellas correspondientes a los grandes cráteres, pero las demás regiones son localizadas y varían en génesis. Ambas *Virgil fossae* y *Duzumi fossae* son fácilmente visibles en el mapa, los escarpes de ambos lados del cañón se muestran de color rojo, es decir con grandes pendientes, esto confirma lo abrupto de estas fracturas y su relación con potentes esfuerzos dentro de la corteza gélida (**Figura 5-4, a**). Otra zona con pendientes muy altas es todo el terreno Sputnik Highlands, las pendientes en él son de lo más variadas, pero en ciertos puntos superan los 75° (**Figura 5-4, b**), estos lugares están esparcidos de manera errática y rodeados de pendientes un poco menores. Dichas variaciones claramente representan el distinto grado de volatilización en la superficie, las regiones más afectadas por este fenómeno generarán los grandes valles y crestas descritos arriba (**Figura 4-6**).

Las pendientes más altas y características son aquellas de los bloques en las cadenas montañosas dentro de SP, cada uno de los bloques consta de una meseta superior y semi plana rodeada en todas direcciones por escarpes casi verticales y muy altos (**Figura 5-4, c**). En el mapa se pudo observar claramente la forma de los bloques y su ubicación espacial, gracias a esto se encontró que, aunque cada cadena montañosa tiene una tendencia, los bloques que la componen se encuentran en estado errático, apuntan en todas direcciones y se juntan unos con otros de manera caótica. Además, los espacios entre bloques se ven claramente con pendientes bajas, de modo que es posible ver cada bloque aislado perfectamente uno de otro.

5.4 Aspecto

El aspecto es un parámetro que indica hacia qué dirección apuntan las pendientes, esta orientación puede ser entendida como dibujando una flecha que señala pendiente abajo y siguiendo el mayor ángulo de inclinación, la dirección de la pendiente es definida por la dirección de la flecha. En el mapa generado, el aspecto es representado con nueve colores distintos, los cuales representan los cuatro puntos cardinales y estados intermedios entre ellos (noreste, noroeste, sureste y suroeste).

Figura 5-5: Mapa de aspecto de la zona de estudio. Se resaltan las direcciones de las pendientes del terreno. Se observa una tendencia hacia el este en el costado izquierdo, y una tendencia al oeste en el flanco derecho de la zona.



El resultado de esta función fue en general una aglomeración de pendientes que se dirigen en todas las direcciones (**Figura 5-5**). Esto resulta concordante con los casi nulos patrones estructurales identificados en los datos satelitales, ya que las direcciones tan aleatorias de las pendientes descartan la existencia de fuertes esfuerzos direccionales y de gran extensión. Aun así, fue posible identificar algunas tendencias muy generales en las direcciones.

La zona de estudio refleja dos tendencias preferenciales en la dirección de las pendientes, solo al observarse a gran escala. Hacia el occidente de la zona de estudio se observó una tendencia general de las pendientes en dirección este, esta disposición es apreciable solamente en las regiones más orientales de los terrenos limitantes con Sputnik Planitia (**Figura 5-5**). El efecto opuesto fue encontrado en la región oriental de la zona de estudio, las pendientes presentan una tendencia general hacia el oeste. el fenómeno ocurre nuevamente en los terrenos limitantes con SP y en las zonas más cercanas a la ella. Estas tendencias no parecen ser un error asociado a la iluminación, de ser así no estarían restringidas a partes de los terrenos. En conjunto ambas tendencias se dirigen claramente hacia Sputnik Planitia, otra tendencia menos clara parece afectar el terreno Voyager terra en las cercanías de SP, en donde las pendientes se dirigen preferencialmente hacia el sur. Nuevamente, los datos al sur de SP no tienen la calidad para ahondar en este aspecto, pero las demás zonas muestran claramente un direccionamiento de sus pendientes hacia la planicie de una manera radial, lo anterior sumado al patrón semi-radial que forman los grandes cañones de Cthulhu Regio parecen indicar que el proceso de formación de Sputnik Planitia tuvo incidencia en los terrenos circundantes, este evento debió ser un fenómeno muy energético y de gran escala.

Gran parte de Sputnik Planitia presenta un color gris en la imagen de aspecto, esto sucede por la casi nula pendiente de la planicie, lo que resulta en una superficie plana sin ninguna orientación. Cabe aclarar que los resultados se ven afectados por la exageración de la planicie producto en la corrección de los datos.

Los bloques en las cadenas montañosas muestran cada uno un par de tendencias preferenciales y que varían de uno a otro, esta disposición apoya la observación hecha anteriormente sobre la aleatoriedad en la que se encuentra cada bloque. Las diferentes formas geométricas de cada uno de ellos es probablemente otro factor que condiciona este comportamiento.

6. Cálculo de temperatura superficial

La temperatura superficial es una variable de suma importancia para entender los procesos geológicos que ocurren en Plutón. Tanto la distribución superficial de compuestos y la posible convección son altamente dependientes de los rápidos ciclos de sublimación y congelación de las moléculas involucradas: CH₄, N₂ y CO. Con el fin de aportar otro argumento a favor de los procesos de disolución y deposición como agentes principales en la dinámica superficial de Plutón, se realizó un cálculo sencillo de la temperatura ambiente utilizando la ecuación de temperatura planetaria efectiva T_e :

$$T_e = \left[\frac{S_0 (1 - A)}{4\sigma} \right]^{\frac{1}{4}}$$

Donde S_0 es la energía solar en la distancia orbital del planeta, A es el albedo o reflectancia total del cuerpo, y σ es la constante de Steffan-Boltzmann. La energía solar disponible en la órbita del planeta fue calculada con la siguiente ecuación:

$$S_0 = \frac{Q}{4\pi r^2}$$

Donde Q es la cantidad de emisión de energía solar y r es la distancia en metros del planeta al Sol. Durante el cálculo se realizaron otras mediciones, como la cantidad de energía capturada por el planeta con base en su sección transversal y la cantidad total de energía absorbida por el planeta teniendo en cuenta su albedo, pero como se menciona en (Randall, 2010) la temperatura es únicamente dependiente de la distancia al Sol y el albedo global del cuerpo de interés.

Como ejercicio comparativo se realizaron los cálculos de temperatura para la Tierra y para Plutón, se utilizaron las ecuaciones arriba mencionadas y se siguieron los pasos sugeridos en (Randall, 2010), todos los valores usados para las constantes y las distancias se muestran en la **Figura 6-1**. Los cálculos fueron realizados en el lenguaje de programación Python y los valores finales obtenidos en grados Kelvin fueron los siguientes: Temperatura de emisión terrestre: 254.86 K, **Temperatura de emisión de Plutón: 37 K**.

Figura 6-1: Código utilizado para los cálculos de temperatura. Dentro se encuentran todas las variables y constantes utilizadas.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pylab as py

"Tierra"
Sun=3.87e+26 #Watts, Energia emitida por el sol.
dt=150e+9 #Metros, Distancia de la Tierra al sol.
Sunto=1367 #W.m-2, Flujo solar a la orbita de la Tierra.
Rt=6371000 #Metros, Radio terrestre.
Ts=(3.1415)*(Rt**2) #Seccion transversal de la Tierra.
Sunt=Sunto*Ts #Watts, Energia solar capturada por la Tierra.
At=0.3 #Albedo terrestre.
Sunta=(1-At)*(Sunt) #Watts, Energia solar absorbida por la Tierra.
b=5.67e-8 #Constante de Boltzman.
Tt=((Sunto*(1-At))/(4*b))**(1/4) #Kelvin, Temperatura de emision terrestre.
print (Tt)

"Plutón"
Sun=3.87e+26 #W Watts, Energia emitida por el sol.
d=4.963e+12 #Metros, Distancia de Plutón al sol.
Sunpo=(Sun)/((4*3.1415)*(d**2)) #W.m-2, Flujo solar a la orbita de Plutón.
Rp=1185000 #Metros, Radio de Plutón.
Ps=(3.1415)*(Rp**2) #Seccion transversal de Plutón.
Sunp=Sunpo*Ps #Energia incidente Pluto
Atp=0.66 #Albedo de Plutón.
Sunpa=(1-Atp)*(Sunp) #Watts, Energia solar absorbida Plutón.
b=5.67e-8 #Constante de Boltzman.
Pt=((Sunpo*(1-Atp))/(4*b))**(1/4) #Kelvin, Temperatura de emision de Plutón.
print (Pt)
```

Los resultados obtenidos son concordantes con las temperaturas esperadas y reales, el valor obtenido para la tierra de 254 Kelvin (-29 ° C) es cerca de 30° más bajo que la temperatura media terrestre, esto se atribuye a que la ecuación utilizada no tiene en cuenta procesos de calentamiento adicionales como el efecto invernadero y la actividad biológica (Randall, 2010). Teniendo en cuenta que en Plutón ninguno de estos procesos de calentamiento adicional están presentes, es seguro asumir que la temperatura media de 37 K es bastante cercana a la real. Observando nuevamente los diagramas de estabilidad de los componentes principales de Plutón (**Figura 2-13**) queda claro que las condiciones superficiales son idóneas para la existencia de estos compuestos en esta sólido, y también, que con leves incrementos en la temperatura es posible la sublimación superficial del N₂, y la convección en las profundidades de Sputnik Planitia propuesta por (McKinnon et al., 2016).

7. Análisis multiespectral

El análisis multiespectral de Plutón se realizó utilizando dos productos distintos, el primero de ellos fueron las firmas locales extraídas de los datos en bruto, con ellas se logró identificar y comprobar los compuestos principales que conforman la corteza del planeta enano. En segundo lugar, se utilizaron mapas composicionales y de abundancia modificados de Schmitt et al., 2016 y Protopapa et al., 2016, para conocer la distribución espacial de los compuestos antes identificados, con esta información se realizó una correlación entre la distribución de los componentes y las geoformas presentes en la superficie. Se realizó un primer análisis para todos los terrenos a excepción de Sputnik Planitia, el cual fue interpretado a profundidad.

Los compuestos más importantes hasta la llegada de New Horizons habían sido bien identificados por Cruikshank et al., 2015, de modo que los datos tomados por el instrumento LEISA fueron enfocados a la identificación de cinco compuestos principales: las moléculas orgánicas que forman los tholins; y los hielos de N_2 , CH_4 , H_2O y CO .

7.1 Firmas espectrales

Las firmas espectrales se obtuvieron utilizando los cubos multiespectrales de LEISA ya reorganizados. Como el objetivo en esta sección era revisar y comprobar la presencia de CH_4 , N_2 y H_2O , los compuestos principales de Plutón, se decidió tomar tres firmas espectrales en las zonas más representativas del planeta enano. La primera en el centro de Voyager Terra, la segunda en la parte baja del terreno Cthulhu Regio, y la última en la unidad Light planitia del terreno Sputnik Planitia. Cada una de ellas fue realizada en un único pixel y en el intervalo de baja resolución espectral, esto se decidió por la mayor cobertura del espectro de este segmento, ya que para compuestos como el CH_4 es más sencillo identificar sus bandas de absorción por su extensión.

De los tres espectros obtenidos el de Voyager Terra entrego los mejores resultados (**Figura 7-1, a**), las tres zonas de absorción de CH_4 aparecen claras e inconfundibles en la firma espectral. Los límites de estas zonas se muestran corridos hacia el infrarrojo, especialmente el segmento de 1,66-1,82 μm . Teniendo en cuenta el estado de procesamiento de los datos, esto parece ser un error instrumental, igual que la constante disminución de los valores de irradiancia al aumentar la longitud de onda. Sin embargo, la claridad de las tres zonas de absorción deja clara la abundancia del CH_4 en este terreno, no se ve una mayor intervención de la firma espectral de otro compuesto, por cual lo se puede decir que los hielos de metano son muy abundantes. Esto se relaciona bien con los análisis geomorfológicos de este terreno.

El espectro de Cthulhu Regio muestra patrones mucho menos definidos que el de Voyager Terra (**Figura 7-1, b**), las amplias zonas de absorción del CH_4 no se pueden encontrar en esta firma, aunque en su lugar parece haber una versión muy disminuida de ellas. En cuanto al hielo de H_2O , se pudieron identificar dos de sus zonas de absorción, pero al igual que con las bandas del CH_4 su señal parece estar sobrepuesta. Esta señal de interferencia debe ser producto de los *tholins*. Cómo este material es muy abundante sobre Cthulhu Regio, es normal que su señal interfiera con las demás. Una consideraciones importante surge de este espectro y al observar la superposición de todos ellos (**Figura 7-2**): a diferencia de Voyager Terra, en Cthulhu Regio existe hielo de H_2O mezclado en gran proporción con *tholins*.

Ya se mencionó como el N_2 posee una banda de absorción muy débil en 2,15 μm , y que muchas veces es opacada por la ancha zona de absorción del CH_4 en 2,2-2,42 μm . Este hecho se ve bien reflejado en el espectro de Sputnik Planitia (**Figura 7-1, c**), las bandas de CH_4 son claras y muy fuertes, demostrando su abundancia en este terreno, pero la banda de nitrógeno es casi imperceptible. La flecha señala la pequeña depresión que genera la presencia de N_2 en la planicie.

Al comparar los espectros se observó cómo la firma de Sputnik Planitia disminuye levemente en comparación con la de Voyager Terra en la línea de 2,15 μm . Aunque el N_2 resulta difícil de observar, su presencia ya se ha comprobado bajo los análisis geomorfológicos y sus consecuencias, además, autores como Schmitt et al., 2016 ya han determinado su abundancia con métodos más exactos.

Figura 7-1: Firmas espectrales de los terrenos. a) Firma del terreno Voyager Terra, se observan las tres zonas de absorción del CH_4 b) Firma del terreno Cthulhu Regio, se observan levemente dos zonas de absorción de H_2O y posibles bandas débiles de CH_4 , esta baja claridad de las bandas es producto de la mezcla de estos compuestos con tholins. c) Firma del terreno Sputnik Planitia, nuevamente aparecen las zonas del CH_4 indicando su gran abundancia, la flecha señala la débil línea de absorción del N_2 .

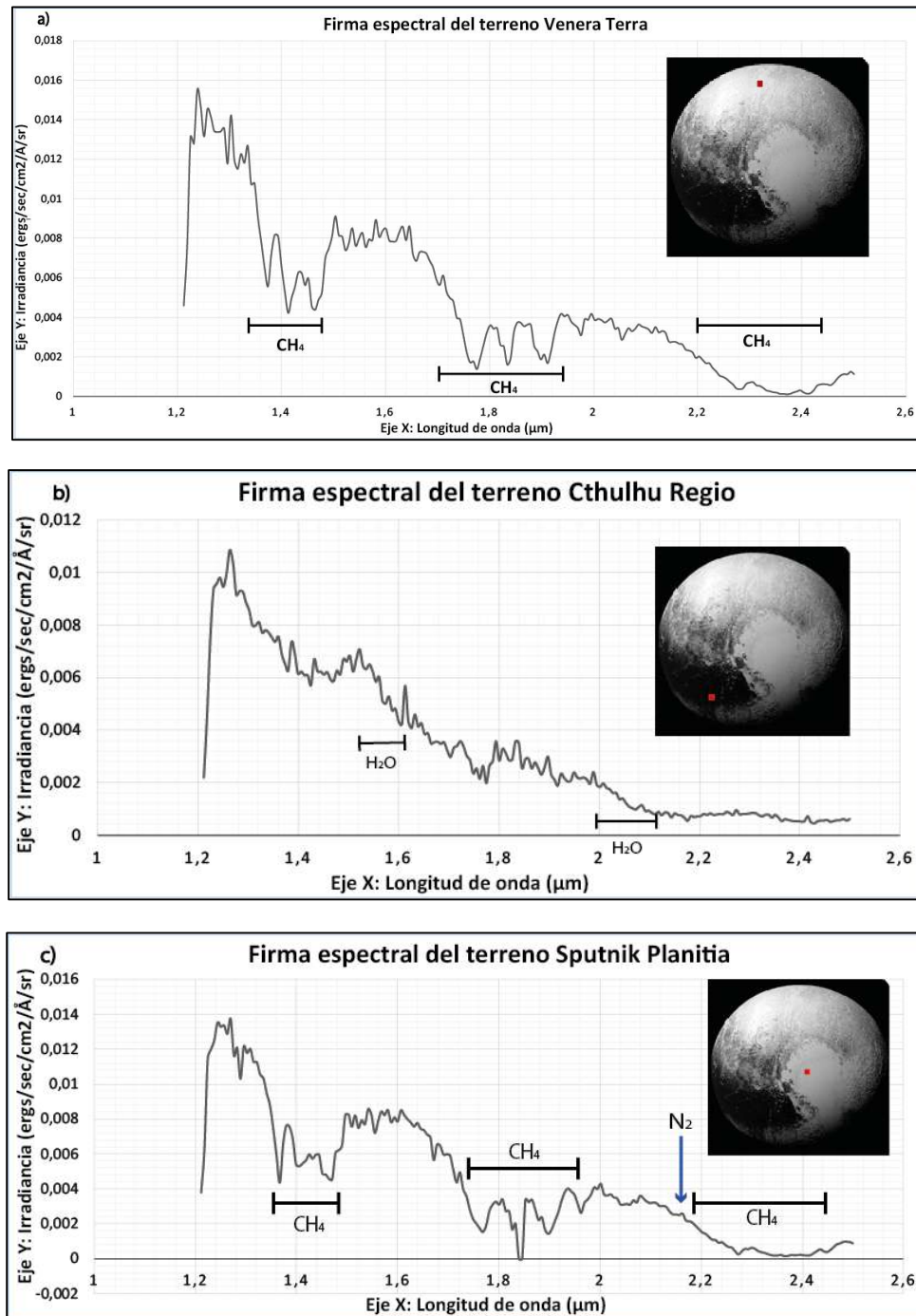
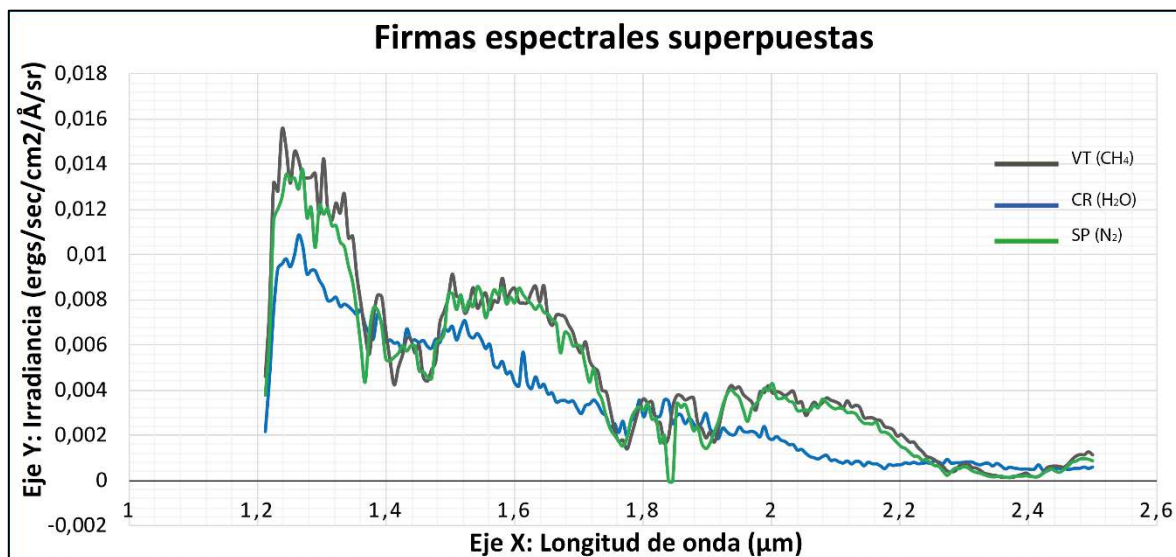


Figura 7-2: Espectros superpuestos. En esta figura se superponen las tres firmas analizadas en Voyager Terra (VT), Cthulhu Regio (CR) y Sputnik Planitia (SP). Es claro como la firma de Cthulhu Regio difiere enormemente de Voyager Terra, debido a su abundancia de H₂O y tholins; por otro lado, la firma de Sputnik Planitia es casi idéntica a la de Voyager Terra, mostrando la abundante cantidad de CH₄ en este terreno.



7.2 Composiciones en los terrenos

Si algo quedó claro desde el inicio es que Sputnik Planitia es diferente de los demás terrenos definidos, este fenómeno no solo ocurre en las geoformas sino también en la composición. Primero se analizó la composición más homogénea y regular del resto de Plutón, para luego hacer un mejor contraste con SP.

Los mapas tomados de Schmitt et al., 2016 fueron utilizados para esta parte del análisis de dos formas distintas. Los mapas de CH₄ y H₂O fueron superpuestos con los mosaicos LD y MD, de modo que fuera posible analizar a profundidad su dispersión por todo Plutón. Por otro lado, ya se conocía como el N₂ y CO se concentran en su mayoría en Sputnik Planitia, de modo que se utilizaron los mapas originales con el objetivo de conservar mejor la información en detalle presente en ellos.

Todos los mapas presentados a continuación utilizan como atributo la propiedad conocida como profundidad de banda ("Band depth", en inglés). Esta medida estima cuanto se separa una banda de absorción característica de un compuesto del espectro continuo de fondo, es decir, toda la demás información presente en el espectro. La profundidad de banda se mide

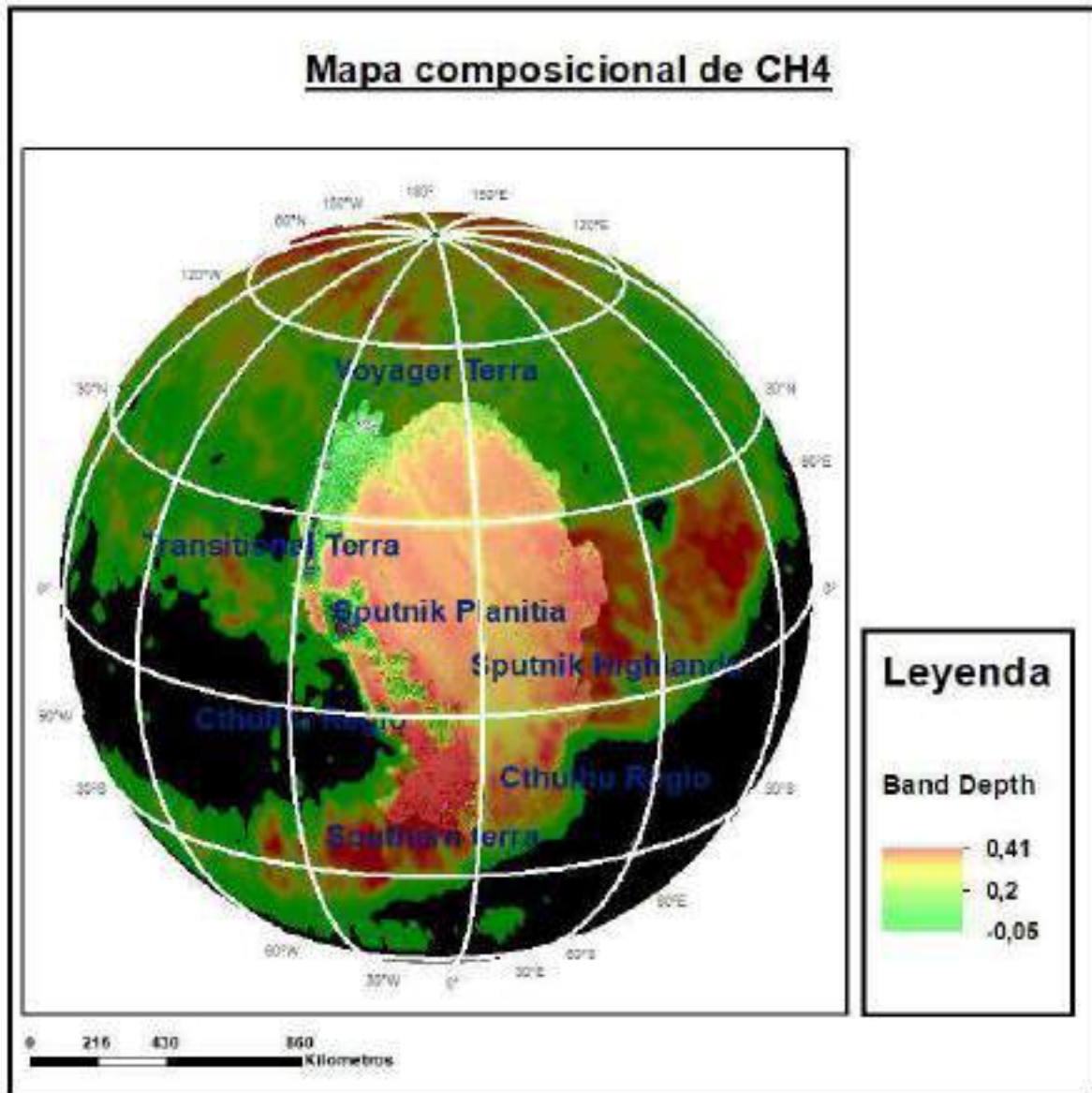
con un numero entre 0 y 1, en donde un número más cercano a 1 representa un mayor alejamiento del continuo, y, por tanto, una mayor concentración del compuesto que está asociado a esa banda. Como la intensidad de las líneas de absorción para cada compuesto es distinta, los valores entre mapas es cambiante, aun así, la concentración relativa puede ser estimada para cada compuesto, de modo que cada mapa representa altas concentraciones en color rojo y bajas en colores verde y azul.

7.2.1 Hielos de CH₄

En el mapa composicional de CH₄ (**Figura 7-3**), se observó que este compuesto es el más abundante en la superficie de Plutón. Estos hielos se extienden por casi toda la corteza en distintas proporciones, siendo más abundante hacia el norte y casi desapareciendo en Cthulhu Regio. Los niveles de CH₄ llegan a su punto máximo en el círculo polar norte, desde donde se reduce gradualmente a medida que decrece la latitud y recorre el terreno Voyager Terra. A partir de los 45 ° de latitud norte las concentraciones cambian de forma muy diferente hacia el sur, y de forma correlativa con la aparición de los terrenos más meridionales. Este decrecimiento hacia el sur en Voyager Terra parece estar relacionado con el grado de insolación de Plutón, la parte más norte es también la más iluminada, de manera que otros compuestos como N₂ y CO se sublimarían rápidamente sin una fuente continua de abastecimiento. Dada la gran cantidad de cráteres y la homogeneidad de la corteza en este terreno, parece poco probable que algún proceso geológico este activo en estas latitudes.

Hacia el oeste, el terreno Transitional Terra resulta una zona con cantidades de CH₄ muy heterogéneas, las concentraciones varían desde intermedias hasta casi nulas. Existe una clara correlación entre los parches de material oscuro en las imágenes de LORRI y la desaparición de los hielos de CH₄, este efecto puede estar relacionado a la aparición de hielos de H₂O, comunes de Cthulhu Regio. Siguiendo por el oeste hacia el sur aparece el terreno Cthulhu Regio, toda la región se caracteriza por la casi total ausencia de hielos de CH₄, siendo la zona de Plutón en donde la concentración de este compuesto alcanza sus menores niveles. En un principio es fácil correlacionar esta ausencia con el gran cubrimiento de tholins, pero otros análisis espectrales mostraron que la región es dominada por los hielos de H₂O.

Figura 7-3: Mapa de la abundancia de CH₄ en el hemisferio observado de Plutón. La propiedad de profundidad de banda (“Band depth”, en inglés) es proporcional a la abundancia del compuesto estudiado. El mapa se realizó en la zona de absorción del CH₄ 1,58 μm -1,83 μm . Las zonas rojas en Sputnik Planitia y el polo norte son las regiones más ricas en este compuesto, seguidas de cerca por Sputnik Highlands.



Fuente: Tomado y modificado de (Schmitt et al., 2016).

En Sputnik Planitia ocurre un aumento instantáneo en la concentración de CH₄, a niveles similares a los encontrados en el polo norte. Hacia el este ocurre un fenómeno diferente, los niveles se mantienen estables hasta alcanzar el terreno Sputnik Highlands, en donde la abundancia de estos hielos vuelve a ser clara. La cantidad de CH₄ es casi tan alta como en

SP en ciertos puntos, pero su distribución es de forma irregular y diseminada. Este patrón de distribución se ajusta al paisaje escarpado e irregular que forman los hielos de este terreno, lo cual indica una posible correlación entre ambos factores. Hacia el extremo más sur, Sputnik Highlands da paso a una pequeña región con concentraciones casi nulas de CH₄, muy similar a lo que ocurre en Cthulhu Regio, este hecho soporta la idea de que lo que otros autores llaman Krun macula es parte de CR.

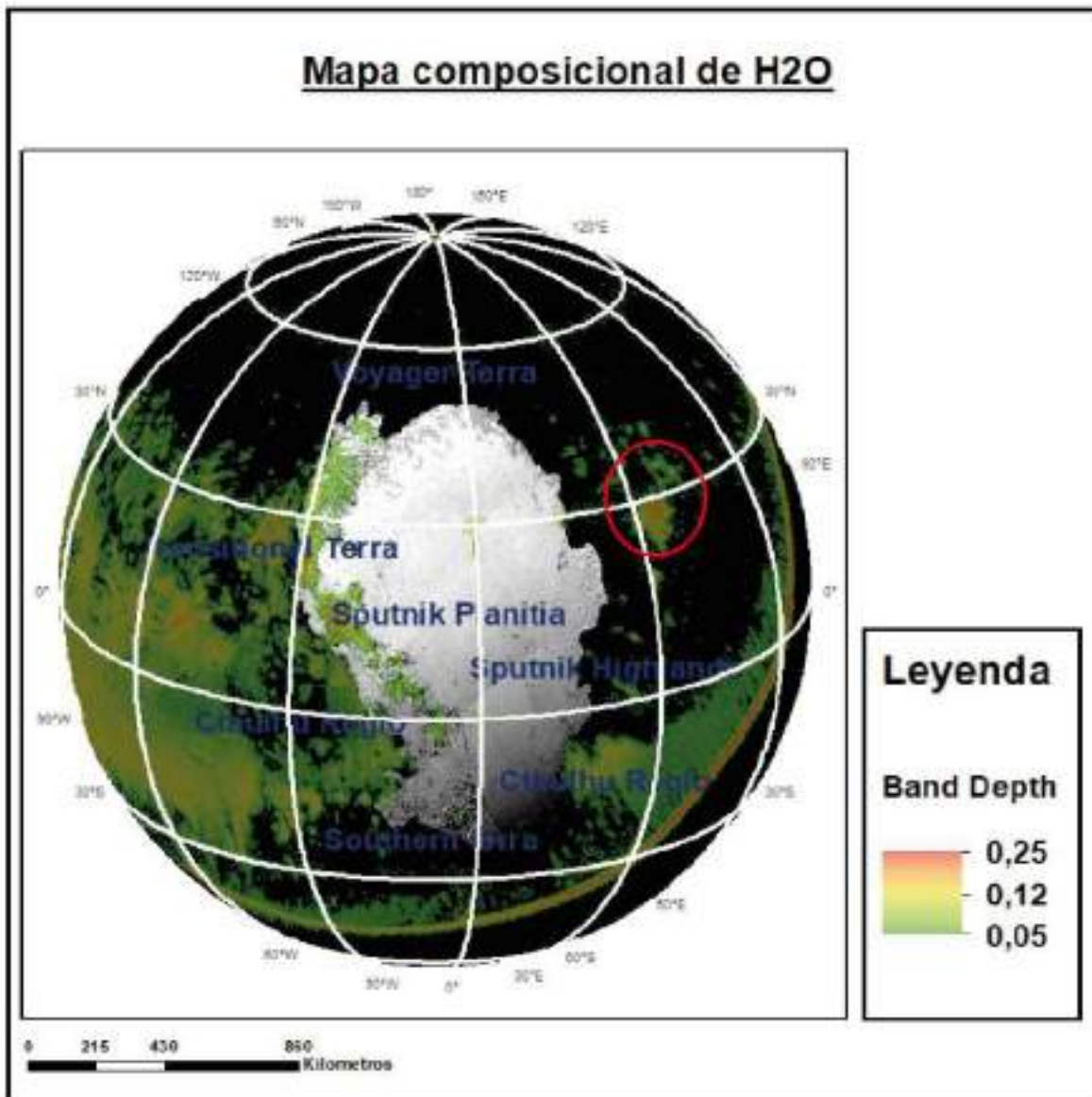
7.2.3 Hielo de H₂O

El hielo de agua es un componente muy localizado en la superficie de Plutón, no se encuentra en el hemisferio norte del planeta enano, pero hacia el sur es más común y aparece de formas variadas. El mayor reservorio de agua es claramente Cthulhu Regio (**Figura 7-4**), las concentraciones en esta zona son intermedias, y se mantienen constantes en toda su extensión. Ningún otro de los componentes principales aparece en este terreno, esto da a entender que toda la zona está compuesta únicamente por hielo de H₂O y *tholins*, lo que también indica una diferenciación en su génesis. La alta resistencia del agua gracias a sus enlaces covalentes se correlaciona bien con las topografías fuertes de Cthulhu Regio y su generalmente alta topografía.

En el terreno Transitional Terra se encuentran los últimos parches de hielos de H₂O hacia la parte occidental de la zona. Los lugares de mayor concentración se correlacionan muy bien con las zonas de bajo albedo que aparecen discontinuamente en este terreno, demostrando que los contrastes geomorfológicos de esta zona son el producto de cambios en la composición de sus hielos.

En el costado oriental se encontraron dos puntos con una fuerte señal de hielo de H₂O; el primero de ellos muy al sur, en la ya comentada porción de CR que se encuentran debajo de SH; nuevamente, esta zona muestra una gran afinidad con CR, por lo que es seguro asumir que comparte su génesis, y tal vez continuidad hacia el costado no observado de Plutón. El segundo punto de concentración de H₂O resulta mucho más enigmático, es una pequeña región de forma irregular que se encuentra a la mitad del costado derecho de Voyager Terra (**Figura 7-4**), no se encontró en la imagen de MVIC ninguna geoforma que se pueda relacionar con este punto rico en agua, de modo que con los datos actuales no es posible llegar a una conclusión acerca de este punto.

Figura 7-4: Mapa de la abundancia de H₂O en el hemisferio observado de Plutón. La mayor concentración se encuentra en las zonas del terreno Cthulhu Regio, y en menor proporción en Transitional terra. La propiedad de profundidad de banda (“Band depth”, en inglés) es proporcional a la abundancia del compuesto estudiado. Se señala un punto anómalo en Voyager Terra.



Fuente: Tomado y modificado de (Protopapa et al., 2016).

En el costado oriental se encontraron dos puntos con una fuerte señal de hielo de H₂O. El primero de ellos muy al sur, en la ya comentada porción de CR que se encuentran debajo de SH. El segundo punto de concentración de H₂O resulta más complejo, es una pequeña región de forma irregular que se encuentra a la mitad del costado derecho de Voyager Terra (**Figura 7-4**), no se encontró en la imagen de MVIC ninguna geoforma que se pueda

relacionar con este punto rico en agua. Con los datos actuales no es posible llegar a una conclusión acerca de este punto.

Los datos espectrométricos indican una fuerte correlación entre las regiones ricas en hielo de H₂O y la cobertura superficial de *tholins*. Las partes de la **Figura 7-4** donde abunda el agua puede superponerse casi exactamente sobre las zonas de bajo albedo en las imágenes de LORRI y MVIC. La relación es clara incluso dentro de Sputnik Planitia, en donde todas las cordilleras se encuentran en algún grado cubiertas por material oscuro, esto parece indicar que las capas de agua están en cierto grado mezcladas con *tholins*, aglomerándose a través de los años por el peso de la acumulación continua de este material marrón cayendo desde la atmósfera.

7.2.2 Hielos de N₂ y CO

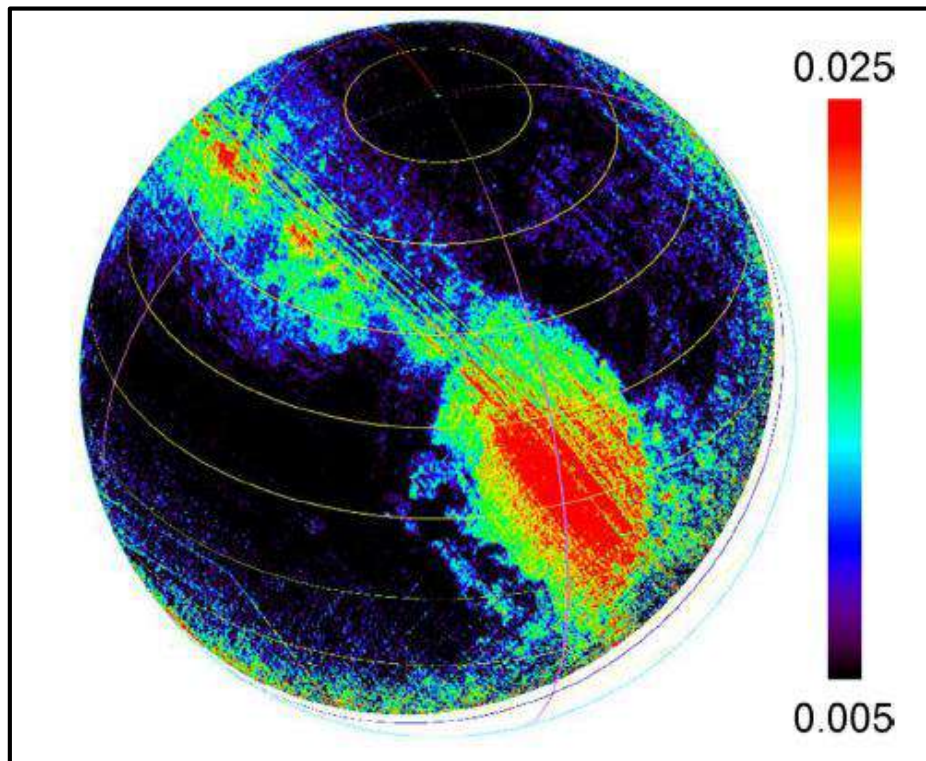
Estos dos compuestos se relacionan de muchas maneras: ambos son los más volátiles de los componentes de Plutón, sus resistencias a la deformación son muy débiles y generalmente se encuentran ambos en solución en las condiciones de Plutón. Además, los resultados de Schmitt et al., 2016 indican que la concentración espacial de CO es completamente dependiente del N₂, mas esto no ocurre en sentido contrario.

Al comparar los mapas composicionales de CO y N₂ (**Figura 7-5** y **Figura 7-6**) queda clara la relación entre ambos. El primero está casi completamente restringido a Sputnik Planitia y a una franja transversal que atraviesa Voyager Terra, correlacionándose bien con los lugares con altas concentraciones de N₂. Unos pocos hielos de CO parecen estar presentes en el terreno Sputnik Highlands, su distribución no se extiende más allá de los límites de este, y nuevamente el patrón que sigue recuerda a las geoformas de este terreno. En todo el borde sur de la **Figura 7-5** los valores de CO son moderados, la forma en que se muestran estos valores parecen estar más relacionados a un error instrumental y no a una característica geológica.

Hacia el noroccidente del terreno Voyager Terra se observó una región con concentraciones anormalmente altas de CO y N₂, esta región se comporta como una banda gruesa que parte de SP y recorre de manera transversal el hemisferio de norte de Plutón en una dirección N45W (**Figura 7-5**). Esta disposición no se correlaciona bien con ningún atributo morfológico observado en Voyager Terra. Se encontró una zona más baja que los alrededores en donde la banda sale desde SP y empieza a avanzar sobre Voyager Terra,

y unas regiones lisas con formas sinusoidales se observaron en la imagen de MVIC (**Figura 2-8**). Además, la textura de la superficie por donde pasa la banda es generalmente más lisa que sus alrededores (**Figura 7-7, b**). Las geoformas anteriores se relacionan bien con la poca resistencia de estos materiales, pero no se encontró ninguna relación clara con Sputnik Planitia.

Figura 7-5: Mapa de abundancia de CO en el hemisferio observado de Plutón. La escala de colores es una representación de la profundidad de banda; entre mayor es este índice, mayor es la concentración de CO. Destaca la alta concentración de este compuesto en Sputnik Planitia. Una franja transversal se extiende por Voyager Terra, y se correlaciona con la aparición de N₂.

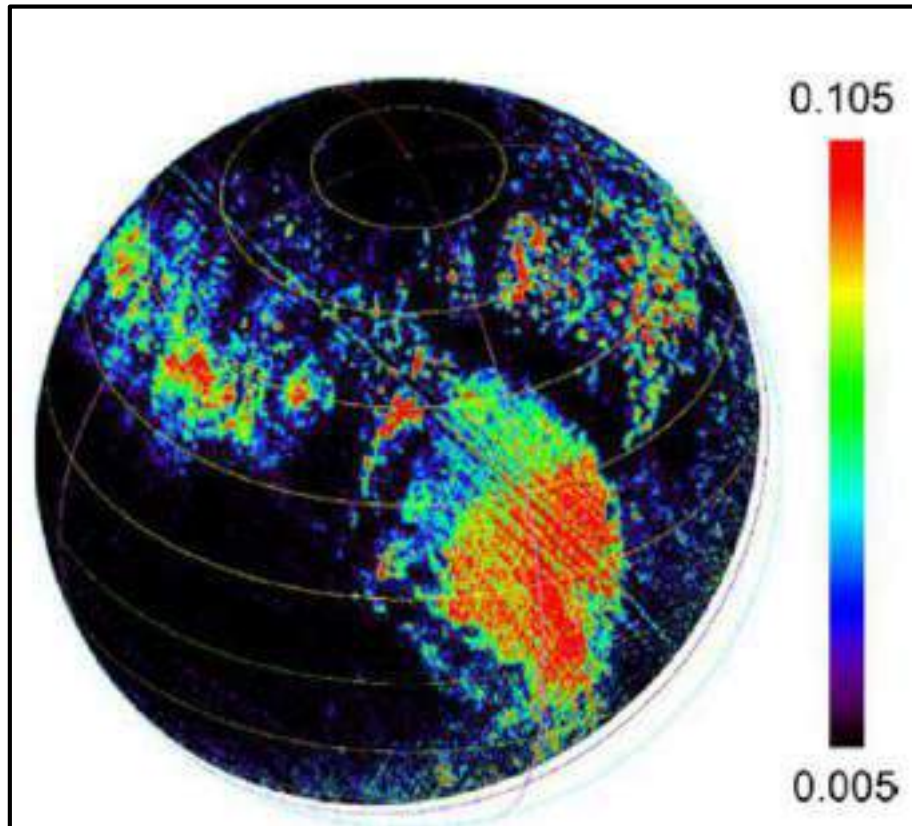


Fuente: (Schmitt et al., 2016).

La concentración de N₂ sigue una tendencia muy similar a la del CO, pero se extiende más. Su distribución espacial en Sputnik Planitia es prácticamente la misma que el CO, excepto por el caso puntual de la gran fosa (**Figura 7-6**). En Sputnik Highlands el N₂ se encuentra en bajas proporciones, y en lugares similares donde aparece CO. Sputnik Highlands parece tener una deficiencia de N₂ y CO, las abundantes evidencias de sublimación parecen indicar que gran parte de los componentes volátiles ya se han sublimado, dejando como

componente principal los hielos de CH_4 . En Cthulhu Regio el N_2 está completamente ausente, lo cual concuerda con las topografías fuertes de este terreno.

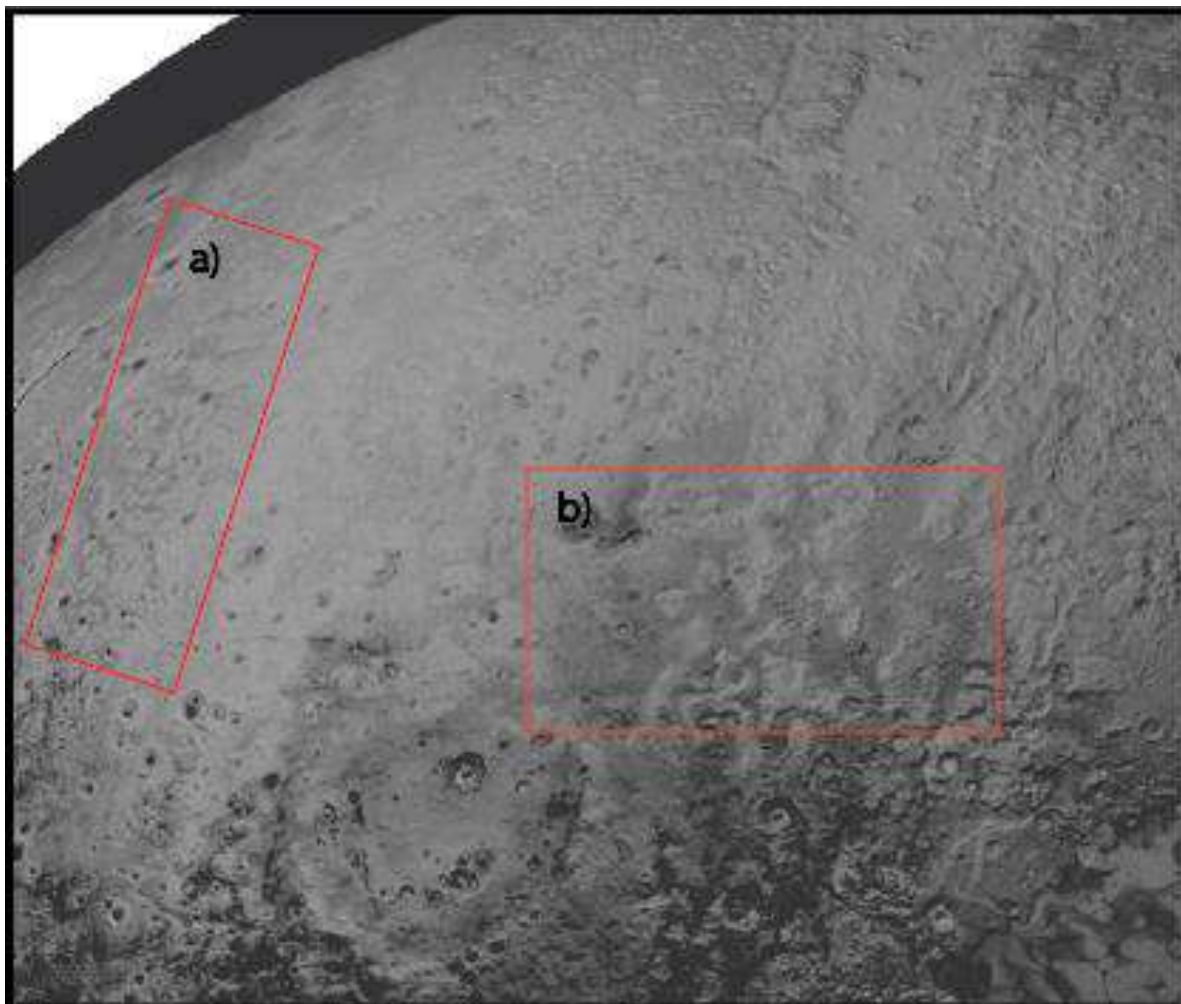
Figura 7-6: Mapa de abundancia de N_2 en el hemisferio observado de Plutón. La escala de colores es una representación de la profundidad de banda, entre mayor es este índice, mayor es la concentración de N_2 . Destacan tres puntos de gran concentración.



Fuente: (Schmitt et al., 2016).

En los terrenos del norte aparecen dos concentraciones importantes de N_2 . La primera de ellas corresponde a la banda de CO que se mencionó anteriormente, donde la mayor concentración de N_2 se correlaciona con el cráter Burney y unas zonas al oeste de él. En la imagen de MVIC se identificaron unos patrones que se asemejan a cauces dendríticos en el extremo norte de la banda de rica en N_2 y CO (**Figura 7-7, a**). Sí estas geoformas están relacionadas de alguna manera con los patrones celulares de SP, podrían explicar la presencia de estos compuestos en esta región. lamentablemente los datos fotográficos para esta zona no son de buena calidad así que no se pudo llegar a una conclusión.

Figura 7-7: Franja de CO y N₂ en la imagen de MVIC. a) Patrones dendríticos, b) Planicies en Voyager Terra.



7.3 Composiciones en Sputnik Planitia

El terreno Sputnik Planitia contiene dentro de su territorio los cuatro componentes principales de Plutón, de una manera u otra todos están relacionados y aportan evidencias sobre la formación y evolución geológica de la planicie.

El componente menos abundante en el terreno es el H₂O, el cual se encuentra restringido a las regiones con altas topografías, es decir, las cadenas montañosas Hillary y Tenzing montes, la **Figura 7-4** muestra claramente que ambas zonas son dominadas por esta composición. De los otros mapas se encontró que existe una cantidad moderada de CH₄ en el segmento norte de Hillary montes, y que el N₂ y CO están prácticamente ausentes en

las cordilleras. La señal de CH_4 en la unidad Hillary montes seguramente está relacionada con el mayor espesor de la cordillera en este punto, ya que esto implica una mayor incorporación de material plástico rico en metano entre los bloques angulares, así haya sido por invasión o al momento de su aglomeración. Ya se mencionó cómo el material oscuro es bastante común a través de toda la cordillera, especialmente hacia el sur, ahora se comprobó que de manera similar a como ocurre en Cthulhu Regio y Transitional Terra, el material oscuro está muy ligado a los sitios formados por hielo de H_2O , en este caso los bloques angulares de Sputnik Planitia. Existe una gran similitud entre los bloques que componen estas cordilleras y las capas de Cthulhu Regio, ambos tienen propiedades geomorfológicas y espectrales muy parecidas. Lastimosamente, la resolución espacial de LEISA no permite conocer la composición de los pequeños bloques identificados en las unidades de la planicie central. Sin embargo, teniendo en cuenta que sus tonalidades, geometrías y resistencias aparentes son casi idénticas a aquellas de los bloques grandes, es posible asumir que su composición es la misma o muy similar, esto último tiene implicaciones muy importantes en la comprensión de la geología de Sputnik Planitia. La unidad denominada como Dark lands muestra una fuerte predominancia de agua y a su vez una marcada ausencia de los volátiles, estas características parecen asociarla a Cthulhu Regio.

Aparte de las cordilleras existe otro gran grupo composicional en Sputnik Planitia, y que en este caso es la planicie misma. En todas las zonas con bajas topografías de este terreno aparecen altos niveles de los compuestos volátiles, todos CH_4 , N_2 y CO muestran en esta zona sus niveles más altos de todo Plutón. Este resultado obedece a la poca resistencia de los hielos que conforman la planicie, la cual solo puede ser atribuida a muy altas concentraciones de N_2 y CO . Como se muestra en la **Figura 2-13**, a la temperatura superficial de Plutón los hielos de la planicie están compuestos por una solución sólida de estos tres volátiles, las distintas proporciones y sus evidencias espectrómetricas son analizadas a fondo por (Protopapa et al., 2016). Los anteriores autores también llegan a la conclusión de que en las fases presentes en Sputnik Planitia el N_2 es el compuesto predominante, con concentraciones mucho menores de CH_4 y CO asociadas, esta disposición es la que condiciona la reología de SP. Las unidades al oeste de la cadena montañosa también muestran una firma similar a la de la planicie central, mas sus concentraciones de N_2 y CO son mucho más bajas. Es posible que estas menores concentraciones de N_2 y CO sean producto de su lejanía a los hielos ricos en estos volátiles

de la planicie central, o a que el bajo grosor de las capas plásticas que se estima para este lugar estén debilitando las ya pequeñas señales de estos dos compuestos.

La cantidad de N_2 varía ligeramente dentro de la planicie. De la **Figura 7-6** se observó que las concentraciones más altas se encuentran en la parte central-izquierda de la planicie central, los contenidos siguen siendo altos hacia el este y el sur, pero hacia el extremo norte de la planicie las concentraciones disminuyen ligeramente, dando paso a una composición más rica en CH_4 . Esta transición ocurre en consonancia con el inicio de la unidad Grey planitia. Como ya se mencionó, el color particular de esta unidad es un efecto óptico debido a la menor presencia de pozos, y siendo el CH_4 menos volátil que el N_2 , es probable que la concentración de pozos sea inversamente proporcional a la concentración de N_2 . La unidad High albedo big trench (HBT) posee una concentración de N_2 más alta que sus alrededores y similar a la del centro de la planicie. Este enriquecimiento parece indicar que el material de esta región está más asociado con las zonas ricas en N_2 de Voyager Terra que con Sputnik Planitia, lo cual también es soportado por la diferencia entre el material de HBT con el resto de la planicie, e incluso con otras partes de la fosa.

El contenido de CO varía de forma similar al N_2 , sus mayores concentraciones se encuentran en el centro de la planicie, y decrece de forma paralela a los bordes de SP hacia los extremos, con una clara deflexión en el borde norte de la planicie central (**Figura 7-5**). Los cambios internos en el contenido de CO no parecen afectar de forma importante las geoformas de la planicie, él que este compuesto sea el menor en proporción con los demás volátiles se refleja en esta baja repercusión en las geoformas.

Las estructuras de flujo presentes en el norte y los grandes pozos de disolución al sur parecen no tener una relación con la composición de los glaciares, aquí se postula que estas estructuras tienen su origen en factores como la geometría de la planicie y la edad de sus distintas zonas, no como un resultado de su composición.

8. Discusión

8.1 Importancia de la reología

Los análisis realizados en este trabajo muestran la importancia de la consistencia y la reología de los compuestos presentes en Plutón para la conformación de cuerpos de roca y la configuración de los distintos terrenos diferenciables en la zona de estudio.

Los procesos atmosféricos de Plutón se reflejan en la evaporación de volátiles, y su deposición junto a moléculas como *tholins* (Stern et al., 2015). Por otro lado, parece poco probable la existencia de procesos erosivos o destructivos de la superficie, debido a la delgada atmósfera plutoniana (Jeffrey M Moore et al., 2017). Lo anterior lleva a que la modificación de la superficie queda relegada a procesos como impactos, acumulación de volátiles, y de forma más acentuada, por fuerzas internas de la corteza, como esfuerzos tectónicos y el proceso dinámico dentro de Sputnik Planitia. Es aquí donde la reología y la consistencia de los compuestos juegan un papel fundamental.

El terreno Cthulhu Regio y los bloques de las cadenas montañosas en Sputnik Planitia se caracterizan por la predominancia de hielo de H_2O , en ambos casos las topografías que forman son fuertes y elevadas, y responden de una manera frágil a los esfuerzos, como se ve en las grandes fracturas que se forman en *Duzumi fossae* y *Virgil fossae*. Esta respuesta es muy similar a la de la corteza de la luna Europa, la cual está por completo fracturada y en donde también predomina la composición de H_2O (G. C. Collins, et al, 2000).

Los tres compuestos volátiles de Plutón cumplen esta característica en distinto grado. El CH_4 es el menos volátil con gran diferencia, sus estructuras parecen soportar el paso del tiempo geológico, mientras que el N_2 y el CO se subliman en escalas de tiempo mucho más rápidas (Jeffrey M Moore et al., 2017). Esto quedo comprobado en las observaciones realizadas en la planicie central de SP, donde las zonas con mayores concentraciones de estos dos compuestos contienen una cantidad inmensa de pozos, los cuales no pueden formarse de una manera distinta a la volatilización. Fuera de sus propiedades volátiles, las zonas ricas en N_2 y CO son a su vez las que contienen menores accidentes geográficos, esta configuración se atribuye a los enlaces químicos de estos compuestos, de tipo Van der

Waals, caracterizados por ser enlaces débiles entre moléculas. Esto lleva a que los cuerpos rocosos dominados por estos compuestos no logren soportar topografías fuertes y reaccionen de una manera semi-dúctil a los esfuerzos que se le apliquen.

Estas diferencias de conformación provocan que exista un contraste entre las zonas dominadas por CH_4 y las que lo son por N_2 . En el terreno Voyager Terra predominan los hielos de metano, y su topografía resulta más accidentada y rígida que su contraparte Sputnik Planitia, donde la composición predominante es N_2 . Aunque esta diferencia es resuelta en parte por el grado de volatilidad, este único factor parece insuficiente para explicar la topografía semi-accidentada de los terrenos ricos en CH_4 , se ha planteado que esto se debe a un tipo de organización especial de las moléculas de CH_4 conocidas como clatratos. En este sistema las moléculas de CH_4 encierran una de H_2O en una red muy resistente, y que de ser este el caso, podrían ser las responsables de las topografías anormalmente fuertes de Voyager Terra.

En el terreno Sputnik Highlands se ha descrito un fuerte proceso de sublimación de volátiles que deja únicamente unas crestas empinadas de material más resistente. Como no se ha encontrado agua en grandes cantidades en este terreno, las crestas deben estar compuestas del material más duradero disponible, el CH_4 . Este terreno ejemplifica de la menor manera la diferencia en la consistencia dentro de los mismos volátiles.

8.2 Edades Relativas

El método más utilizado para estimar las edades en cuerpos fuera de la Tierra es el criterio de densidad de cráteres (Kneissl, et al., 2015). Esta medición parte del principio de que a través del tiempo geológico los impactos meteóricos han sido eventos continuos y repetitivos, esto conlleva a que los cráteres se acumulen en una superficie, a menos que esta sea renovada por algún proceso geológico. Tal es el caso de la Tierra, donde la tectónica de placas y los procesos erosivos son una fuente continua de retrabajamiento de la superficie y eliminación de cráteres de impacto. Fuera de nuestro planeta, las dinámicas internas y atmosféricas de otros cuerpos son completamente distintas, por esta razón la densidad de cráteres se convierte en una herramienta sumamente útil para calcular edades relativas de las superficies e identificar actividad geológica. Esta metodología es especialmente útil en sitios donde la atmósfera es escasa, como Marte o Plutón. Aunque el resultado de este método es una datación relativa, por medio de análisis estadísticos es posible llegar a intervalos de tiempo que por lo menos permiten diferenciar temporalmente

los distintos terrenos dentro de un mismo cuerpo (Kneissl et al., 2015). Los cráteres más grandes también presentan una evidencia de impactos más viejos, ya que a medida que se avanza en el tiempo geológico, la cantidad de grandes asteroides y posibles impactos disminuyen exponencialmente.

En el caso de Plutón este método resulta sumamente útil, los distintos terrenos muestran claramente una gran diferencia en la cantidad de cráteres que tienen asociados. La mayor cantidad de ellos se encuentran en Cthulhu Regio, donde además se encuentran en promedio cráteres de mayor tamaño, algunos de estos cráteres incluso muestran evidencias de deformación en su estructura y la presencia de otros impactos cubriéndolos. La distribución de los cráteres al igual que sus tamaños es bastante homogénea en toda la extensa área perteneciente a este terreno, de modo que toda la superficie debe tener una edad similar. La abundancia de cráteres indica que este es el terreno más antiguo de Plutón, los grandes tamaños de algunos impactos y la alta densidad parecen indicar una edad superior a los 3 Ga (Stern et al., 2015).

Los terrenos Transitional Terra y Voyager Terra muestran una densidad de cráteres muy similar, en ambos lugares la cantidad es alta, pero nunca a los niveles de Cthulhu Regio. La parte más cercana al polo norte muestra una menor cantidad de impactos, seguramente efecto de la acumulación de volátiles, más activa en estas latitudes por el ya mencionado proceso de insolación. Aunque la menor cantidad de evidencias de impacto indican que estos terrenos son más recientes que Cthulhu Regio, la presencia de cráteres de gran tamaño evidencia que en general no ha habido grandes procesos geológicos activos en un intervalo de tiempo considerable.

Tanto Sputnik Planitia como Sputnik Highlands comparten una característica muy importante, en ninguno de estos dos terrenos se pueden apreciar cráteres de ningún tipo. Esto no solo indica que toda la región es la más joven de Plutón, también es una muestra de que existió actividad geológica recientemente, probablemente en un periodo menor a 10 millones de años (Stern et al., 2015). Aunque la densidad de cráteres es un buen método para diferenciar temporalmente los terrenos, en este caso particular no proporciona una mayor discriminación entre SP y SH, los cuales son dos terrenos evidentemente diferentes geológicamente, y probablemente temporalmente.

Como el método de conteo de cráteres no resultó útil en este caso, se decidió aplicar otro método de comparación que probablemente solo sea aplicable a Plutón: el grado de sublimación de volátiles. Debido a que ambos SP y SH poseen una composición hasta

cierto punto similar, es decir con la presencia de los tres compuestos volátiles y total ausencia de H_2O , es posible establecer una secuencia de tiempo con el grado de volatilización de sus volátiles, y por consiguiente la cantidad y desarrollo de pozos. Cómo estas geoformas son el resultado de una continua sublimación de N_2 y CO , entre mayor tiempo lleven expuestos, mayor será la profundidad y tamaño de los pozos. Siguiendo este postulado queda claro que SH es considerablemente más antiguo que SP, los pozos de este terreno están tan desarrollados que formaron un paisaje muy accidentado.

Este método puede ser usado incluso para diferenciar periodos de tiempo dentro de Sputnik Planitia. Cómo se estableció en la sección de análisis geomorfológicos, la textura rugosa y las dimensiones de los pozos dentro de SP van aumentando hacia el este y el sur, esto indica que estas unidades no han sido renovadas recientemente y por consiguiente son progresivamente más viejas, o visto de otro modo, la actividad parece haber mermado progresivamente hacia la planicie central desde estas dos direcciones.

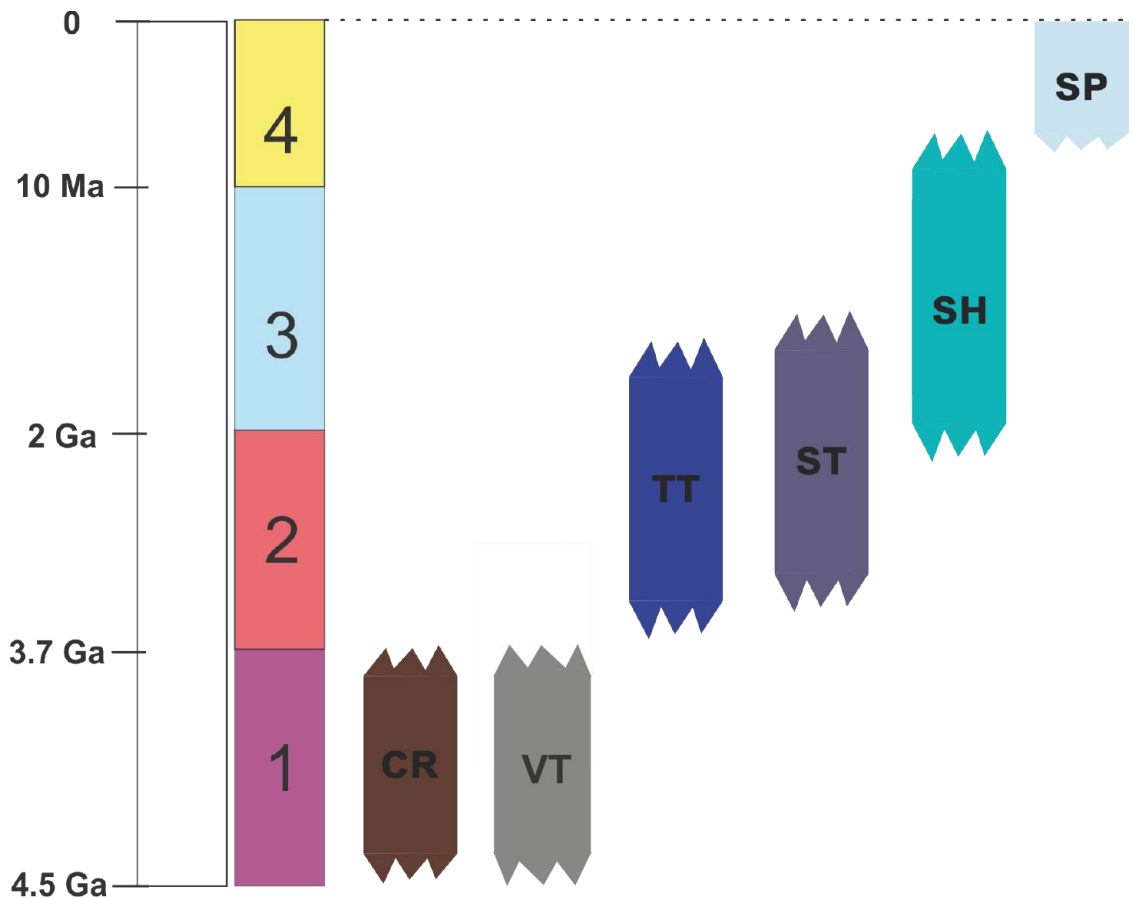
El análisis anterior nos permite separar los terrenos de Plutón en cuanto a su edad, lo cual es un paso muy importante para entender la evolución geológica de la zona de estudio, un esquema diferencia los terrenos por sus edades se puede observar en la **Figura 8-1**.

En la **Figura 8-1**: Edades relativas. El esquema muestra los cuatro periodos de tiempo más relevantes en cuanto a la formación y desarrollo de los terrenos pertenecientes a la zona de estudio. Las edades son relativas, calculadas a través del conteo de cráteres realizado por Jeffrey M. Moore et al., 2016 y las implicaciones temporales de los eventos geológicos. Los bordes punteados de las figuras significan que las edades están sujetas a grandes errores, la figura busca ejemplificar la sucesión en que se formaron los terrenos, no dar fechas exactas. se muestran los cuatro periodos de tiempo más relevantes en cuanto a la formación y desarrollo de los terrenos pertenecientes a la zona de estudio. Estos fueron divididos así:

- **1:** Periodo de tiempo más antiguo en la historia de Plutón, ambos Cthulhu Regio (CR) y Voyager Terra (VT) parecen haber existido durante el evento conocido como gran bombardeo tardío (3.7 Ga), pero la menor cantidad de cráteres de VT sugieren alguna actividad de renovación de la superficie posterior a esta época.
- **2:** En este periodo se diferenciaron los terrenos Transitional Terra (TT) y Southern Terra (ST) de Cthulhu Regio, por la constante movilización de volátiles desde la atmósfera y la actividad de Voyager Terra.
- **3:** Este periodo es considerablemente más reciente que los anteriores. Es marcado por el continuo levantamiento y volatilización de los hielos de Sputnik Highlands (SH).

- **4:** Intervalo más reciente, es el tiempo mínimo en el que se han desarrollado las características actuales de Sputnik Planitia (SP), evidenciado por la completa ausencia de cráteres.

Figura 8-1: Edades relativas. El esquema muestra los cuatro periodos de tiempo más relevantes en cuanto a la formación y desarrollo de los terrenos pertenecientes a la zona de estudio. Las edades son relativas, calculadas a través del conteo de cráteres realizado por Jeffrey M. Moore et al., 2016 y las implicaciones temporales de los eventos geológicos. Los bordes punteados de las figuras significan que las edades están sujetas a grandes errores, la figura busca ejemplificar la sucesión en que se formaron los terrenos, no dar fechas exactas.



8.3 Convección y sus señales

Sputnik Planitia representó desde un principio un enigma geológico, la razón de su topografía y sus pozos ya ha sido vislumbrada, al igual que la forma en que sus distintos compuestos interactúan. Pero entender su dinámica interna y los procesos geológicos que dieron lugar a esta cuenca resulta, y la ausencia de datos geofísicos y multitemporales es

un gran inconveniente. Lo anterior lleva a que desvelar estos procesos sea una tarea algo especulativa, de modo que a continuación se plantea una hipótesis utilizando los datos disponibles, algunas modelaciones numéricas realizadas por varios autores y principalmente, partiendo de unos conceptos claros que fueron definidos a través de los análisis geomorfológicos, morfométricos y composicionales.

Antes de postular un proceso de formación se definieron una lista de características y resultados claros que cualquier modelo geológico a postular debería explicar satisfactoriamente, de esta manera se restringen las posibles soluciones y el grado de especulación. Estos conceptos fueron definidos partiendo de los resultados de esta investigación:

- La superficie de Sputnik Planitia es reciente, la falta de cráteres y el menor grado de sublimación da cuenta de esto. Zonas con un incremento en la cantidad y tamaño de pozos son probablemente más antiguas.
- Los bloques de H₂O dentro de SP no pudieron formarse en fase con los hielos volátiles que forman la planicie, su firma espectral y tonalidad se asemejan bastante al terreno Cthulhu Regio. Los bloques pequeños dentro de la planicie central se asemejan a los bloques grandes de las cadenas montañosas.
- El compuesto predominante de la planicie es el N₂, los hielos que forma son mecánicamente débiles y responden a los esfuerzos de una manera semi-dúctil.
- Los hielos de Sputnik Planitia se encuentran sobre los terrenos más antiguos de Voyager Terra y Cthulhu Regio. Los contactos hacia el oeste y el sur dan cuenta de una regresión de los glaciares.

La mayor incógnita que debe ser resuelta sobre Sputnik Planitia es la formación de sus patrones poligonales. Estas celdas se extienden por una gran parte de la planicie, varían entre 10 a 50 km de diámetro y sus formas pueden ser pentágonos, hexágonos o polígonos irregulares, los polígonos son rodeados por una serie de estructuras lineares que ocasionalmente presentan una cresta central. Estas morfologías han resultado ser únicas en el sistema solar por su tamaño y el material en que se forman, se han planteado unos pocos procesos que podrían explicar este desarrollo partiendo de ejemplos similares en la Tierra y otros cuerpos del sistema solar, pero muchos de ellos resultan inadecuados en las anómalas condiciones de Sputnik Planitia.

La primera comparación que se intentó realizar fue un símil a las grietas de desecación producidas en arcillas o depósitos superficiales de sales, principalmente por la semejanza

entre las formas poligonales que se forman en ambos casos. Sin embargo, esta teoría presenta problemas en varios de los preceptos establecidos. En primer lugar está la reología del material y el proceso mismo de desecación, en suelos arcillosos estas grietas se producen por la deshidratación del suelo y consecuente compactación de las arcillas, esta reducción en volumen produce que el suelo se fracture generando dichos patrones. En Sputnik Planitia no ocurre ningún proceso de deshidratación, y aunque podría ser comparable con la sublimación de N_2 y CO , las propiedades semi-dúctiles de los hielos de la planicie acomodarían el esfuerzo rápidamente, impidiendo el fracturamiento frágil de su superficie. Este proceso tampoco explica satisfactoriamente el hecho de que toda la planicie sea de una edad tan joven, ya que el agrietamiento no borraría completamente las señales de cráteres. Además, el tamaño de las celdas en Sputnik Planitia es demasiado grande como para que un proceso como este actué a tal escala. El análisis anterior descarta fácilmente esta teoría.

La segunda opción que se ha planteado es que las celdas sean el reflejo de un esfuerzo tectónico interno fracturando la cuenca. Esta opción presenta los mismos problemas que la anterior en cuanto a la respuesta de los materiales. Un fracturamiento de este tipo necesitaría una respuesta frágil por parte de los hielos de la planicie, lo cual no es el caso. Sin embargo, sufre otra dificultad, el patrón aparentemente errático y aleatorio formado por las celdas requeriría de una distribución de esfuerzos increíblemente compleja. Una explicación estructural al problema requeriría una configuración interna y de esfuerzo muy complicada, y teniendo en cuenta que existen soluciones más sencillas no se optó por esta teoría.

La última hipótesis es la más completa y la que presenta mayores evidencias a su favor, se trata de un proceso de convección ocurriendo al interior de Sputnik Planitia. Para que este proceso se dé satisfactoriamente bajo la cuenca es necesario que se cumplan ciertos requisitos (McKinnon et al., 2016). En primer lugar, la composición a profundidad de SP debe ser similar a la encontrada en superficie, lo cual es posible teniendo en cuenta la dimensión de la cuenca y la homogeneidad de sus geoformas.

Otro requisito es que la cuenca tenga una profundidad de al menos 2 km para que se produzca una convección estable, teniendo en cuenta que la región en sí misma está muy por debajo que los terrenos circundantes, y que estos a su vez poseen pendientes que descienden hacia SP, es posible asumir que SP tiene una profundidad considerable. Otro argumento a favor es la presencia de los grandes bloques de Hillary Montes, su disposición

parece indicar que se encuentran sustentados en el material de la cuenca, y teniendo en cuenta que sus alturas cercanas a los 3000 metros, serían necesarias unas raíces de proporciones semejantes. De ser este caso, la profundidad de SP debería superar la profundidad necesaria fácilmente, al menos hacia el margen oeste.

El último requisito necesario es una fuente de calor estable que pueda subir la temperatura al punto de que estos compuestos se muevan para dispersar el calor. Este límite de temperatura es aproximadamente 70° kelvin, de modo que tan solo es necesario un incremento de 30° desde la superficie. Según los cálculos de Trowbridge et al., 2016, este delta de temperatura es fácilmente alcanzado haciendo un balance energético entre la radiación solar recibida, el grosor de la masa de hielo y principalmente, la energía liberada por decaimiento radioactivo en las capas internas de Plutón.

El que todas estas condiciones sean cumplidas da un buen soporte a la teoría convectiva, la cual es explicada y sustentada físicamente por los autores McKinnon et al., 2016 y Trowbridge et al., 2016. Los resultados para el numero de Rayleigh obtenidos por ellos indican una fácil convección en el sistema de Sputnik Planitia, además de que apuntan a un tipo de convección lenta única en el sistema solar.

Aunque la convección es posible teóricamente y a través de los modelos, es necesario revisar paso a paso cómo se cumplen los criterios establecidos, de esta manera fue posible establecer una hipótesis cercana a lo que estaría pasando en Sputnik Planitia. En primer lugar, la convección por si misma resuelve el problema de la reciente edad de la planicie, la constante salida de material desde el subsuelo es uno de los pocos procesos que lograría mantener una superficie libre de cráteres. Esto trae implícito que material nuevo está surgiendo constantemente a la superficie, lo cual debería verse reflejado en las geoformas.

La expresión superficial de esta convección está relacionada con los patrones poligonales, el problema reside en como la configuración de estos polígonos se pueden atribuir a este proceso. White et al., 2017, Trowbridge et al., 2016 y McKinnon et al., 2016 han propuesto que procesos criovolcánicos ocurren en el centro de la célula y se traslada hacia los bordes de la misma, para finalmente subducir hacia el interior de la planicie en los bordes de cada polígono. Sus argumentos consisten en que se midió una diferencia de altura de unos 50 m desde el centro de la célula hasta las estructuras de los bordes, que estarían más bajas, sumado a esto, atribuyen una menor concentración de pozos hacia los centros de la célula como un efecto del material más nuevo emergiendo por el centro y acumulándose en los bordes. Aunque en este trabajo hay un acuerdo con los autores con respecto a la

convección como proceso generador de Sputnik Planitia, se plantea una configuración superficial diferente a la postulada por estos autores.

En primer lugar, se consideró que encontrar una diferencia de altura tan precisa entre las células y sus bordes es algo dudoso debido a la calidad de los datos, ya se ha mencionado como el DEM disponible (el mismo para ambos estudios) presenta una gran cantidad de ruido en la zona de Sputnik Planitia, esto sumado a que el origen fotoclinométrico del DEM en los mosaicos de LORRI conlleva a grandes errores en altitud no permite realizar de forma segura mediciones tan precisas.

En segundo lugar, está el problema de la subducción, este proceso requiere que la capa que cae hacia el interior sea rígida y más densa que la capa superior. Nuevamente la reología de los hielos en la planicie juega un papel fundamental. El que estos cuerpos no pueden formar capas rígidas y la homogeneidad composicional de toda la planicie representan un gran impedimento para que el proceso de subducción ocurra. Aparte de la Tierra, el único lugar en el sistema solar donde se ha postulado subducción es en el satélite Europa de Júpiter (Kattenhorn & Prockter, 2014). En estos dos lugares la subducción es posible por la densidad de las capas que subducen y principalmente debido a su rigidez. En la Tierra, la corteza oceánica es considerablemente más densa que la continental, y en Europa, aunque la subducción se daría en capas de H_2O , la consistencia del material podría permitir que capas más viejas y frías se dirijan hacia abajo. En Sputnik Planitia estas condiciones no se cumplen, de modo que una subducción convencional no parece posible en Plutón.

El asunto de la disminución de pozos hacia el centro de las celdas podría ser una evidencia de la convección como la postulan los autores, pero en los análisis realizados esta característica parece no estar extendida en todas las células, además, la disposición de algunas áreas con pocos pozos parece aleatoria y no se asemeja a la forma general de la celda, lo cual se esperaría si en estos lugares ocurriera la salida de material. Es posible que esta característica pueda explicarse mejor por algún proceso ambiental o diferencia composicional.

El mayor problema con esta configuración reside en las fuentes de material. En ningún centro de célula aparece alguna geoforma que indique la salida de criomagma, es de esperarse que en un proceso convectivo aparezca una estructura bien definida y clara de donde se alimente la superficie con material nuevo. Los mosaicos HD se extienden sobre varias células, el centro de todas ellas parece homogéneo a excepción de una ocasional

disminución de pozos de sublimación. Este hecho resulta más poderoso en contra de esta configuración que los aparentes patrones de sublimación a favor, de modo que en este trabajo se postuló una configuración diferente.

8.4 Modelo convectivo propuesto

Sabiendo las limitaciones geológicas y observacionales de los datos, se propuso un cambio a la forma en la que la convección se expresa en superficie. La principal modificación es el cambio de la fuente de criomagma desde el centro de la celda hacia los bordes de los polígonos. Estas geoformas tienen una configuración muy particular, son unas estructuras que se extienden longitudinalmente y que al encontrarse unas con otras delimitan los polígonos. Internamente son depresiones que generalmente poseen una cresta elevada central que se eleva por encima de las partes cercanas de la célula, esto se evidenció en los mosaicos de LORRI, en donde las crestas tienen una iluminación mayor, y, además, provocan una ligera sombra sobre las zonas aledañas. Estas crestas poligonales recuerdan a las dorsales terrestres, pero más allá de esto, son las únicas estructuras elevadas que puede ser tomada como fuentes de material. Se consideró que estas características son suficientes para postular estas geoformas como fuente del criomagma, donde la cresta central es la línea por donde se alimenta de material a los polígonos.

La mayor complicación de este modelo reside en que sucede con el material una vez ha salido del subsuelo. Ya se mencionaron las dificultades de una subducción, por lo cual se postuló un método diferente de pérdida de material: la sublimación. La volatilización parece un fenómeno muy acentuado y relativamente rápido en Sputnik Planitia, y que ha mostrado ser efectivo para remover grandes cantidades de material de la planicie. También se encontró que en los sitios donde la dinámica interna de la cuenca esta activa puede evitarse la sublimación extensiva del sistema. El nuevo material que sale alimenta la célula, que en intervalos de tiempo no muy grandes puede relajarse fácilmente para evitar que la sublimación altere dramáticamente su forma.

Aparte de los patrones poligonales, los bloques de H_2O que forman las cadenas montañosas son la mayor incógnita de Sputnik Planitia, para resolver este problema es necesario tener en cuenta la densidad de ambos medios. Los hielos ricos en N_2 y CO tienen una densidad similar al agua líquida (1 gr/cm^3), lo que teóricamente permitiría que el hielo rico en H_2O y por tanto menos denso (0.9 gr/cm^3) pueda flotar en ellos. Ahora bien, estos

bloques de agua pudieron haber estado en esta posición al momento de formarse Sputnik Planitia o ser puntos altos del material bajo la planicie, pero ambos casos pueden ser descartados observando las características de estos fragmentos. Estos bloques se encuentran de forma errática y aparentemente aislados unos de otros dentro de las cordilleras. Sí estos fragmentos fueran realmente relictos intactos del basamento, presuntamente Cthulhu Regio, deberían presentar un mayor parecido geométrico con este terreno, lo cual no se observó en ninguno de los casos.

Queda claro entonces, que los bloques tuvieron alguna clase de retrabajamiento antes de llegar a su posición actual, y la clave parece encontrarse en los pequeños bloques repartidos por la planicie. La gran mayoría de estos fragmentos pequeños se encuentran dentro de las crestas poligonales, incluso llegando a delimitar ellos mismo una célula (**Figura 4-25, f**). Esta correlación, sumada a la diferencia de densidad, es una clara señal de que los bloques de H₂O están emergiendo desde el interior de SP, por los mismos conductos de donde asciende el criomagma. Estos bloques ascendentes pueden ser relictos del evento geológico que formó Sputnik Planitia y que quedaron varados en su interior, y también pueden ser fragmentos arrastrados desde el fondo de la cuenca por el proceso convectivo. Todo esto aporta una prueba adicional a que bajo Sputnik Planitia se extiende el antiguo terreno Cthulhu Regio. Los bloques que conforman las cadenas Hillary y Tenzing Montes son de grandes proporciones, parece poco probable que el rozamiento producto de la convección sea capaz de desprender fragmentos de tales proporciones, de modo que estos bloques pudieron haberse formado como relictos atrapados dentro de Sputnik Planitia durante su proceso de formación.

Esta génesis requeriría de un evento altamente energético, lo que podría apuntar a un impacto meteórico como causante y generador de la cuenca donde se extiende SP. Es importante resaltar como la mayoría de bloques se concentran hacia el oeste y no se ve ninguno de ellos hacia el noreste u otras direcciones, esto concordaría con un cambio del basamento bajo Sputnik Planitia hacia el norte, pasando de Cthulhu Regio a Voyager Terra. El modelo convectivo postulado es representado en la **Figura 8-2**.