

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS

CARRERA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



FOTOGRAMETRÍA TERRESTRE APLICADA A
INVESTIGACIONES GLACIOLÓGICAS
(CASO GLACIAR CHARQUINI SUR, 16°S)

Tesis de grado presentada para la obtención del Grado de Licenciatura
en Ingeniería Geológica

POR: FABIÁN LÓPEZ ALBA
TUTOR: PHD. ING. ÁLVARO SORUCO SOLOGUREN

LA PAZ - BOLIVIA

Abril, 2014

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS
CARRERA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

Tesis de grado:

FOTOGRAMETRÍA TERRESTRE APLICADA A INVESTIGACIONES GLACIOLÓGICAS
(CASO GLACIAR CHARQUINI SUR, 16°S)

Presentado por: Univ. Fabián López Alba

Para optar el grado académico de *Licenciado en Geología*

Nota Numeral:.....

Nota literal:.....

Ha sido:.....

Director de la carrera de Ingeniería Geológica: Ing. Víctor Ramírez F.

Tutor: PhD. Ing. Álvaro Soruco Sologuren

Tribunal: Dr. Jaime Argollo B.

Tribunal: Ing. Víctor Ramírez. F

Tribunal: Ing. Félix Espinoza R.

A mi madre Angélica.

Agradecimientos

Le doy gracias a mis padres por todo su apoyo brindado a lo largo de mi vida, por darme la oportunidad de tener una excelente educación y por ser un excelente ejemplo de vida a seguir.

A mis hermanos por apoyarme en aquellos momentos de necesidad y por ser una parte importante de mi vida.

A todos los ingenieros de la carrera de Ingeniería Geología por toda su dedicación y conocimiento compartido.

Agradezco a todos los miembros del IRD, particularmente a Jean-Emmanuel Sicart por todo su apoyo durante la investigación y a Benjamin Lehman por toda su ayuda brindada en el campo, por su amistad desde que inicie en el proyecto.

De igual manera agradecer a mi Tutor de Tesis de Grado, PhD. Ing. Álvaro Soruco por su confianza, por su apoyo y por sus consejos que aportaron a mi formación como persona y profesional.

A todos mis amigos por todos los momentos que pasamos y principalmente por haber hecho de mi etapa universitaria un trayecto de vivencias que nunca olvidare.

Contenido

CAPITULO I: GENERALIDADES.....	1
1.1. Introducción.	1
1.2. Antecedentes.	2
1.3. Planteamiento del problema.....	3
1.4. Planteamiento de objetivos.	3
6.2.1. Objetivo general.	3
6.2.2. Objetivos Específicos.	3
1.5. Hipótesis.	4
1.6. Justificación.	4
1.7. Aportes.....	5
CAPITULO II: MARCO TEORICO.....	6
2.1. Glaciar.....	6
2.1.1. Definición de glaciar.	6
2.1.2. Partes de un glaciar.....	6
2.2. El balance de masa de un Glaciar.....	8
2.3. Métodos de estimación del balance de masa de un glaciar.....	8
2.3.1. Método glaciológico.	8
2.3.2. Método hidrológico.	9
2.3.3. Método volumétrico.	9
2.4. Los glaciares tropicales y su repartición a nivel mundial.	10
2.5. Los glaciares sobre la Cordillera Oriental en Bolivia.....	12
2.6. Fluctuación de los glaciares desde la pequeña edad del hielo.	14
2.7. Fluctuación de los glaciares en los últimos 50 años.	17
2.7.1. Caso Glaciar Chacaltaya.	18
2.7.2. Caso Glaciar Illimani.....	19
2.8. La evolución del clima durante las últimas décadas en la zona intertropical.....	20
2.9. Los fenómenos ENSO.....	21
CAPITULO III: DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO	25
3.1. Presentación del Área.	25
3.1.1. Ubicación.....	25

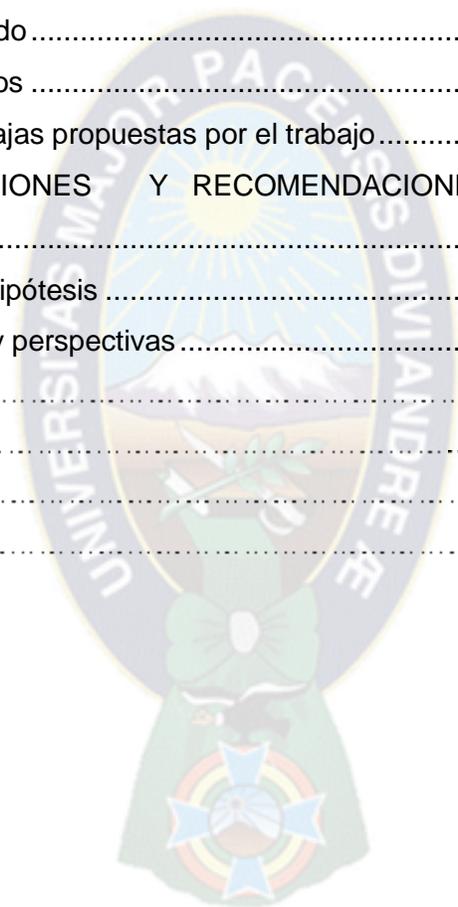
3.1.2.	Límites y Superficie.	26
3.1.3.	Acceso.....	28
3.2.	Marco Geológico.	28
3.2.1.	Geomorfología.....	29
3.2.1.1.	Procesos Glaciares.....	32
3.2.1.1.1.	Geoformas debidas a procesos de erosión glaciár.	32
3.2.1.1.1.1.	Circos Glaciares.....	33
3.2.1.1.1.2.	Rocas aborregadas.....	33
3.2.1.1.1.3.	Valle glaciár.	35
3.2.1.1.2.	Geoformas debidas a procesos de acumulación glaciár.	35
3.2.1.1.2.1.	Manto de Till.	36
3.2.1.1.2.2.	Morrena.	37
3.2.1.1.2.2.1.	Morrenas Laterales.	37
3.2.1.1.2.2.2.	Morrenas Frontales.	38
3.2.1.1.2.2.3.	Morrena Central.	39
3.2.1.2.	Procesos Periglaciares.....	39
3.2.1.2.1.	Geoformas debidas a procesos de erosión periglaciár.	40
3.2.1.2.1.1.	Aristas dentadas.	40
3.2.1.2.2.	Geoformas debidas a procesos de acumulación periglaciár.	40
3.2.1.2.2.1.	Cono de derrubios.....	40
3.2.1.2.2.2.	Canchales.....	41
3.2.1.2.2.3.	Suelos Ordenados.	42
3.2.1.2.2.3.1.	Suelos almohadillados.	42
3.2.1.2.2.3.2.	Suelos escalonados.....	43
3.2.1.2.2.3.3.	Suelos Poligonales.....	43
3.2.1.2.2.3.4.	Suelos estriados.....	44
3.2.1.3.	Procesos Fluvio-glaciales.....	44
3.2.1.3.1.	Geoformas por procesos de erosión fluvio-glaciár.	45
3.2.1.3.1.1.	Terrazas.....	45
3.2.1.3.2.	Geoformas debidas a procesos de acumulación fluvio-glaciár.	45
3.2.1.3.2.1.	Canales fluvio-glaciales.....	45
3.2.1.3.2.2.	Abanico Fluvio-glaciár.	48
3.2.2.	Estratigrafía.	48

3.2.2.1.	Formación Amutara.....	49
3.2.2.2.	Formación Cancañiri.....	49
3.2.2.3.	Formación Uncía.....	50
3.2.2.4.	Formación Intrusivo Huayna Potosí.....	50
3.2.3.	Geología Estructural.....	50
3.2.3.1.	Diaclasas.....	51
3.2.4.	Cuerpos Ígneos.....	51
3.2.5.	Metamorfismo.....	53
3.2.6.	Influencia del lecho rocoso en masas de hielo.....	53
3.2.6.1.	Resistencia.....	54
3.2.6.2.	Color.....	57
CAPITULO IV: CÁLCULO DEL BALANCE DE MASA MEDIANTE EL MÉTODO GLACIOLÓGICO.....		58
4.1.	Determinación de los parámetros morfométricos de la Cuenca Glaciar.....	59
4.1.1.	Red de balizas.....	59
4.1.2.	Contorno Glaciar.....	60
4.1.3.	Curvas Hipsométricas.....	61
4.2.	Balance de masa Glaciológico.....	62
4.2.1.	Zona de acumulación.....	62
4.2.2.	Zona de ablación.....	65
4.2.3.	Cálculo del balance de masa anual 2006 - 2013 por rango altitudinal.....	67
4.2.4.	Comparación con los años precedentes.....	68
CAPITULO V: ESTIMACIÓN DE LA SUPERFICIE TOPOGRÁFICA MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA AÉREA.....		69
5.1.	Principios de la fotogrametría.....	69
5.1.1.	Fundamento de la fotogrametría.....	69
5.1.2.	Etapas de la fotogrametría.....	70
5.1.3.	Estereoscopia.....	71
5.1.4.	Instrumentos de estereoscopia.....	72
5.1.4.1.	Estereoscopio de bolsillo.....	72
5.1.4.2.	Estereoscopio de espejos.....	72
5.1.4.3.	Anaglifo.....	73
5.1.5.	Divisiones de la fotogrametría.....	74

5.1.5.1.	Fotogrametría Aérea.....	74
5.1.5.2.	Fotogrametría Terrestre.....	74
5.1.6.	Productos fotogramétricos.....	75
5.1.6.1.	Mapas topográficos o Mapas de isolíneas.....	75
5.1.6.2.	Fotomosaico.....	75
5.1.6.3.	Ortofoto.....	75
5.1.7.	Aplicaciones de la fotogrametría.....	76
5.1.8.	Ventajas y Desventajas de la fotogrametría.....	77
5.1.8.1.	Ventajas de la fotogrametría.....	77
5.1.8.2.	Desventajas de la fotogrametría.....	78
5.2.	Estimación de la superficie del glaciar Charquini Sur en el año 2006 mediante Fotogrametría Aérea.....	78
5.2.1.	Preparación.....	79
5.2.1.1.	Puntos de control o apoyo.....	80
5.2.1.2.	Imagen digital.....	82
5.2.2.	Aerotriangulación.....	83
5.2.2.1.	Orientación Interna.....	83
5.2.2.2.	Orientación Externa.....	84
5.2.2.2.1.	Medición de los puntos de enlace.....	85
5.2.2.2.2.	Medición de los puntos de Control.....	86
5.2.3.	Restitución fotogramétrica.....	88
5.2.4.	Construcción del Dem 2006.....	92
CAPITULO VI: APLICACIÓN DE UNA NUEVA METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA SUPERFICIE TOPOGRÁFICA MEDIANTE FOTOGAMETRÍA TERRESTRE.....		95
6.1.	Preparación.....	95
6.1.1.	Calibración.....	96
6.1.1.1.	Cámaras bajo el punto de vista de la calibración.....	96
6.1.1.2.	Cámara fotográfica digital.....	96
6.1.1.3.	Modelo geométrico de la cámara.....	98
6.1.1.4.	Modelo de distorsión.....	98
6.1.2.	Calibración geométrica de objetivos para la cámara canon EOS 5d Mark-II.....	99
6.1.2.1.	Panel de calibración.....	100
6.1.2.2.	Calibración del Objetivo con focal de 15 mm.....	100

6.1.2.3.	Calibración del Objetivo con focal de 50 mm.....	102
6.1.2.4.	Calibración del objetivo con focal de 50 mm al infinito.....	105
6.1.2.4.1.	Preparación e instalación de las marcas de control.....	105
6.1.2.4.1.1.	Selección del sitio de instalación.....	105
6.1.2.4.1.2.	Marcas de control.....	106
6.1.2.4.1.3.	Instalación de las marcas de control.....	107
6.1.2.4.2.	Medición de los puntos de control.....	107
6.1.2.5.	Calibración del objetivo con focal de 20 mm al infinito.....	108
6.1.3.	Establecimiento de una red de marcas de control sobre el Glaciar de Charquini Sur.....	110
6.1.3.1.	Diseño de las marcas de control.....	110
6.1.3.2.	Instalación de las marcas de control.....	112
6.1.3.3.	Medición de las coordenadas de las marcas o puntos de control.....	113
6.1.4.	Elección del objetivo para la cámara.....	117
6.1.5.	Ubicación del sitio de la toma.....	117
6.2.	Adquisición fotográfica terrestre.....	118
6.2.1.	Toma de las fotografías.....	118
6.2.2.	Toma topográfica de coordenadas de las bases.....	118
6.2.3.	Características de la toma terrestre sobre el glaciar de Charquini Sur Julio de 2013.....	119
6.3.	Preparación.....	120
6.3.1.	Selección de pares estereoscópicos.....	120
6.3.2.	Preparación de pares estereoscópicos.....	122
6.3.3.	Identificación de los puntos de control.....	123
6.4.	Triangulación.....	123
6.4.1.	Orientación interna.....	123
6.4.2.	Orientación Externa.....	123
6.4.2.1.	Cálculo de los ángulos de rotación.....	124
6.4.2.2.	Transformación de coordenadas UTM a coordenadas auxiliares Orima.....	128
6.4.2.3.	Calculo de la Orientación Externa.....	129
6.4.2.3.1.	Medición de los puntos de enlace.....	129
6.4.2.3.2.	Medición de los puntos de Control.....	130
6.4.3.	Restitución fotogramétrica.....	132

6.4.4.	Construcción del Dem 2013.....	135
6.5.	Estimación de la exactitud de la restitución	136
6.5.1.	Modelo 2006.....	136
6.5.2.	Modelo 2013.....	138
6.6.	Estimación del balance de masa del glaciar de Charquini Sur mediante el método Volumétrico (Septiembre 2006 a Agosto 2013).....	139
6.6.1.	Sustracción de Dem's.....	139
6.6.2.	Calculo del balance de masa 2006 - 2013.....	142
6.7.	Validación del método	143
6.8.	Análisis de resultados	147
6.9.	Ventajas y Desventajas propuestas por el trabajo.....	148
CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		150
7.1.	Conclusiones.....	150
7.2.	Comprobación de Hipótesis	153
7.3.	Recomendaciones y perspectivas	153
BIBLIOGRAFIA.....		155
ANEXOS.....		159
Anexo 1.....		159
Anexo 2.....		162



Índice de Figuras

Figura 1: Diagrama del corte longitudinal de un glaciar donde se observan las zonas de acumulación y ablación y otros elementos como la línea de equilibrio y morenas. (World Glacier Monitoring Service (WGMS)).....	8
Figura 2: Distribución de glaciares tropicales en el mundo, (Kaser et al., 1996).....	11
Figura 3: Principales glaciares en la Cordillera Real (Jordan, 1991).	14
Figura 4: Esquema de perfil de las 10 morrenas frontales estudiadas por Rabatel (2005) 16	
Figura 5: Evolución de la superficie del glaciar Charquini Sur después del máximo PEH limitadas por las morrenas M1 hasta M10 (Rabatel, 2005)	17
Figura 6: Glaciar Chacaltaya vista desde el flanco Norte del cerro Farellon, los polígonos muestran el retroceso desde 1940 hasta el 2001 y se especulaba su extinción hasta el 2010 - 2015 (Ramírez, 2001)	18
Figura 7: Fotografías del glaciar Chacaltaya, con la ayuda de una directriz que va desde el tope hasta la base glaciar donde se aprecia claramente el retroceso desde 1940 hasta el 2005 (Ramírez, 2007).....	19
Figura 8: Evolución del glaciar Illimani en los últimos 50 años, donde los polígonos rojos corresponden al contorno glaciar para el 2009 y el contorno azul al borde frontal en el año 1963 (Ramírez, et al., 2010)	20
<i>Figura 9: Condiciones normales. Donde La termoclina en el margen Este está muy cerca de la superficie del océano y muy cerca al margen occidental del continente americano pero en el margen Oeste esta es más profunda. (Gulf of Marine Research Institute, 2012).</i>	22
<i>Figura 10: Condiciones del fenómeno de El Niño. Donde la termoclina en el margen Este está muy cerca de la superficie del océano y muy cerca al margen occidental del continente americano pero en el margen Oeste esta es más profunda y más cercana a Australia. (Gulf of Marine Research Institute, 2012).</i>	23
<i>Figura 11: Condiciones del fenómeno de La Niña. Donde la termoclina está cerca de la superficie en el Este del océano y mucho más profunda en el occidente. Las precipitaciones se producen en el occidente del océano. (Gulf of Marine Research Institute, 2012).</i>	23
Figura 12: Mapa de ubicación del cerro Charquini en la región de Milluni.....	25
Figura 13: Fotografía aérea orto-rectificada del macizo Charquini con curvas de nivel a partir de la Fotografía 144 del vuelo 2006).....	26
Figura 14: Imagen Satelital del Glaciar Charquini Sur Datum WGS-84 (Google Earth 2012)	27
Figura 15: Mapa Fotogeológico en base al mapa geológico del área de estudio.	29
Figura 16: Esquema de los 5 glaciares del macizo Charquini (Rabatel, 2005).	30
Figura 17: Fotografía del glaciar Charquini Sur tomada desde su valle glaciar al sur.....	31
Figura 18: Fotografía de un pequeño circo glaciar adyacente al borde Este del Glaciar Charquini Sur.....	33
<i>Figura 19: Fotografía de rocas aborregadas en el valle del Glaciar Charquini Norte, la flecha indica la dirección de movimiento que habría seguido el glaciar.</i>	34

Figura 20: Fotografía de grietas en rocas aborregadas que evidencian la dirección de flujo del glaciar.	34
Figura 21: Fotografía del valle Glaciar en "U" visto desde el Glaciar Charquini Sur.	35
Figura 22: Fotografía del depósito de Till en el glaciar Charquini Sur.	36
Figura 23: Morrenas laterales del margen Este del Glaciar Charquini Sur.	37
Figura 24: Fotografía de perfil de una morrena terminal en el Glaciar Charquini Sur.	38
Figura 25: Fotografía de las 10 morrenas del Glaciar Charquini Sur donde las más grandes vienen a ser las morrenas de avance y las de menor tamaño de retroceso (Rabatel, 2005).	38
Figura 26: Fotografía de aristas dentadas que marcan el límite del glaciar Charquini oeste, Visto desde el nevado Huayna Potosí.	40
Figura 27: Fotografía de un cono de derrubio que se desarrolla a faldas de una pared rocosa al Este del glaciar Charquini Sur.	41
Figura 28: Fotografía de canchales formados en el margen Sur del Glaciar Charquini Oeste formando una superficie lisa de dos tonos.	41
Figura 29: Fotografía de suelos almohadillados redondeados también llamados bofedales, con una importante presencia de agua, sobre el glaciar Charquini Norte.	43
Figura 30: Fotografía de suelos escalonados formados hacia el glaciar Charquini Norte.	43
Figura 31: Fotografía de suelos poligonales formados en una superficie de baja pendiente y saturado en agua, los surcos son rellenados con cantos.	44
Figura 32: Fotografía de suelos estriados que se forman sobre superficies con pendiente moderada con surcos rellenados por cantos.	44
Figura 33: Fotografía que muestra el desarrollo de terrazas sobre el valle glaciar, tomada desde el camino hacia el glaciar Charquini Sur.	45
Figura 34: Fotografía aérea ortorectificada de la zona baja del glaciar Charquini Sur donde se aprecia abanicos y canales fluvio-glaciales (Fotografía 144 del vuelo hecho el año 2006).	47
Figura 35: Fotografía de un Xenolito presente en afloramientos de Granito perteneciente a la formación intrusivo Huayna Potosí.	52
Figura 36: Fotografía del contacto metamórfico entre roca sedimentaria y roca ígnea en el margen Noroeste del intrusivo Charquini Sur.	53
Figura 37: Lecho rocoso granítico del glaciar Charquini Norte.	56
Figura 38: Paisaje del Glaciar Charquini Sur visto desde su valle.	56
Figura 39: Mapa Hipsométrico del Glaciar Charquini Sur para el 2013.	62
Figura 40: Esquema de la medición en la zona de acumulación, equipo PICO en el pit (a), pared de nieve descubierta (b), segmentos core (c), cilindro de metal y balanza electrónica para calcular el volumen de muestras (d).	63
Figura 41: Gráfica de los 3 pits donde se ve la densidad vs profundidad.	64
Figura 42: Esquema de una baliza instalada sobre el glaciar durante el tiempo t_{i-1} y t_i	65
Figura 43: Proceso fotogramétrico del objeto al modelo, donde el objeto es capturado en una imagen, esta imagen es medida para luego aplicar la restitución de su superficie y generar un modelo digital tridimensional donde el ser humano con la ayuda de modelos físicos y matemáticos realiza este proceso (Luhman, 2006).	70
Figura 44: modo de percepción y generación del 3D a partir de la estereoscopia.	71

Figura 45: Fotografía de un estereoscopio de bolsillo utilizado para una visión tridimensional.	72
Figura 46: Fotografía de un estereoscopio de espejos utilizado para fotointerpretación de fotografías aéreas.	73
Figura 47: Esquema de la visión anaglífica utilizando un anáglifo para ver imágenes en 3D.	74
Figura 48: Esquema representativa de orto rectificación de fotografías aéreas, que parte de una proyección cónica (superficie cuadrículada) a una plana (superficie celeste).76	
Figura 49: Fotografía de la Cámara métrica Zeiss RMK TOP 15 (Ramírez, 2011).	79
Figura 50: Esquema de las fotografías aéreas del 2006 aerotrianguladas donde se advierten las fotografías 144 y 145 (Soruco, 2012).	80
Figura 51: Esquema de los puntos base: Fabulosa, Unión, Milluni y Cumbre, con los puntos de control medidos para el vuelo del 2006 (Soruco, 2012).	81
Figura 52: Scanner fotogramétrico VEXCEL Ultrascan 5000 (Ramírez, 2011).	82
Figura 53: fotografías aéreas 144 y 145 tomadas el año 2006 respectivamente digitalizadas.	83
Figura 54: Imagen del formato de la marca fiducial No 1 correspondiente a la fotografía aérea 144.	84
Figura 55: Esquema de los elementos de la orientación externa.	85
Figura 56: La figura muestra todos los puntos de enlace representados con recuadros rojos, los puntos de control representados con triángulos rojos.	86
Figura 57: Imagen del par fotogramétrico luego de la triangulación, margen superior izquierdo fotografía 144, margen inferior derecho fotografía 145.	87
Figura 58: Arreglo del par estereoscópico en el visor Stereo Window (fotografía 144 de color rojo y fotografía 145 de color azul).	88
Figura 59: Mapa de los puntos medidos mediante restitución fotogramétrica del glaciar. 89	
Figura 60: Imagen de la aplicación del Terrain Editor utilizada para la corrección de puntos restituidos, se observa la red de puntos que generan las curvas del nivel color azul y verde, en el Glaciar Charquini Sur.	90
Figura 61: Arreglo irregular de triángulos de Delaunay (TIN) que modelan el glaciar Charquini Sur para el año 2006 visto en planta.	91
Figura 62: Modelado del glaciar Charquini Sur visto desde el SW.	92
Figura 63: Mapa topográfico de la superficie del Glaciar en el año 2006.	93
Figura 64: Imagen en 3D del modelo Raster del glaciar Charquini Sur 2006, la línea roja representa el contorno glaciar para ese año.	94
Figura 65: Fotografía de la cámara canon EOS 5D MARK-II vista de frente.	97
Figura 66: Fotografía del objetivo a focal fija canon EF 20mm/F2.8 vista de costado.	97
Figura 67: Fotografías del panel tomadas desde diferentes posiciones, para realizar la calibración del objetivo de 15 mm.	100
Figura 68: diagramas generados por MatLab donde se presenta los parámetros extrínsecos de las tomas hechas con la focal de 15 mm visto desde arriba.	101
Figura 69: Modelo de distorsión completa calculada por el programa MATLAB.	102
Figura 70: Fotografías del panel desde diferentes posiciones, para realizar la calibración del objetivo 50mm.	103

Figura 71: Diagramas generados por MatLab donde se presenta los parámetros extrínsecos de las tomas hechas con la focal de 50 mm.	104
Figura 72: Modelo de distorsión para la calibración de la focal de 50mm.....	104
Figura 73: Fotografía frontal del edificio Geología-Geografía de la UMSA en el campus de Cota Cota fotografía tomada con focal de 50 mm.	106
Figura 74: Fotografía de la Placa de medición RS50 vista de frente.....	106
Figura 75: Fotografía de la Placa RS50 pre-instalada sobre una vara de metal con un recodo en el extremo inferior.	107
Figura 76: Imagen de la estación total Kolida KTS-585R	108
Figura 77: Fotografía del salón Ecrins del laboratorio IRSTEA en Francia, con las marcas topográficas instaladas (Soruco).....	109
Figura 78: Fotografía de la marca tipo MT tomada antes de su instalación en el glaciar.....	110
Figura 79: Fotografía de la marca ML3 instalada sobre roca, tomada luego de la primera nevada donde la superficie presenta una ligera cobertura de nieve.....	111
Figura 80: Fotografía de la marca MX2 pintada sobre granito ubicado al borde del glaciar sobre una grieta que se encontraba parcialmente cubierta por nieve.	111
Figura 81: Fotografía aérea del 2006 ortorectificada del glaciar Charquini Sur con las correspondientes marcas de control tipo ML, MT y MX instaladas para la toma de fotografías 2013.....	112
Figura 82: GPS diferencial base estacionado sobre el punto BM1.....	113
Figura 83: Punto base BM1 donde fue instalado el GPS diferencial estación base.....	114
Figura 84: Fotografía de la marca MX1 y el GPS móvil tomando las coordenadas XYZ de posición.	115
Figura 85: Diagrama generado por el programa Topcon Tools V8 para ajustar las coordenadas de las marcas MX y MT en tomando como referencia al punto Base BM.	116
Figura 86: Fotografía aérea con los flancos Oeste y Este del glaciar Charquini Sur para la adquisición fotográfica para el año 2013.....	118
Figura 87: Fotografía de la antena del GPS diferencial (estación móvil) sobre el punto BF3.....	119
Figura 88: Fotomosaico de las fotografías terrestre 271 – 272 tomadas desde la posición BF2 del glaciar Charquini Sur con los puntos de control y coordenadas.....	120
Figura 89: Esquema de la disposición del primer par estereoscópico de la parte inferior del glaciar.	121
Figura 90: Esquema de la disposición del segundo par estereoscópico de la parte superior del glaciar.	121
Figura 91: Fotografías 267 y 282 respectivamente correspondientes al primer par estereoscópico de la parte media y baja del glaciar Charquini Sur, con los ajustes aplicados.	122
Figura 92: Fotografía de la marca MX3 pintada en un bloque de granito sobre el glaciar Charquini Sur.....	124
Figura 93: Diagrama de cálculo del ángulo de rotación sobre el eje Z, visto en planta.	125
Figura 94: Diagrama de cálculo del ángulo de rotación sobre el eje Z, visto de perfil.....	125

Figura 95: Diagrama del cálculo de los ejes de rotación mediante el método diédrico se ve los puntos en planta y perfil.	126
Figura 96: Imagen de la herramienta Point Measurement donde se ve ambas fotografías del primer par estereoscópico fotografía 267 y 282, donde se marcaron los tie points (de color verde) para enlazar ambas fotografías.	130
Figura 97: Figura generada por el LPS con los puntos de enlace del primer par estereoscópico triangulado de las fotografía 267 y 282.	131
Figura 98: Figura generada por el LPS con los puntos de enlace del segundo par estereoscópico triangulado fotografía 271 y 281.	131
Figura 99: Modelo estereoscópico de los 2 pares estereoscópicos 267 - 282 y 271 - 281 luego de la triangulación visto en ArcGis.	132
Figura 100: Imagen del Stereo Window en Arcgis, donde se ve la aplicación del Terrain Editor.	132
Figura 101: TIN del glaciar Charquini Sur 2013 en coordenadas Orima.	133
Figura 102: Modelo Dem vector del glaciar Charquini Sur 2013 en coordenadas WGS84.	134
Figura 103: Imagen tridimensional generado del glaciar visto desde el SO.	134
Figura 104: Mapa de curvas de nivel que representan la superficie del glaciar del 2013 realizado por el programa SURFER.	135
Figura 105: Modelo Dem raster del glaciar Charquini Sur del año 2013, la línea roja representa el contorno para ese año.	136
Figura 106: Punto MX5 (color amarillo) sobre el par estereoscópico del 2016, se observa un pequeño desplazamiento de la cruz entre las pantallas b y c.	137
Figura 107: Punto MX1 sobre el par estereoscópico del 2013, se observa que la marca (Cruz blanca) coincide con el punto ploteando (Cruz Amarilla), el recuadro a. muestra las coordenadas.	138
Figura 108: Modelo raster generado en 3D para el glaciar Charquini Sur, año 2006. ...	140
Figura 109: Modelo raster generado en 3D del glaciar Charquini Sur año para el año 2013.	140
Figura 110: Superposición de las curvas de nivel del modelo 2013 (líneas negras) sobre el 2006 (líneas rojas).	141
Figura 111: Modelo final del periodo 2006-2013, las zonas rojas muestran pérdida de masa y las azules ganancia de masa en el glaciar Charquini Sur.	142
Figura 112: Diagrama de comparación entre el método volumétrico y el método glaciológico para el periodo 2006 – 2013 del glaciar Charquini Sur.	147

Índice de Tablas

Tabla 1. Distribución de glaciares en la zona tropical. (Kaser, 1999).	12
Tabla 2: Zonas glaciares en la Cordillera Oriental o Real en Bolivia y sus superficies (Jordan, 1991).	13
Tabla 3: Distribución temporal de las morrenas desde la PEH (Rabatel, 2005)	16
Tabla 4: Características de los fenómenos climatológicos, El Niño, La Niña.....	24
Tabla 5: Formaciones aflorantes en el área de estudio.....	49
<i>Tabla 6: Características físico-mecánicas de varios tipos de rocas (Ramírez et al., 2004).</i>	54
Tabla 7: Evaluación In Situ de resistencia del material rocoso (Ramírez et al., 2004).....	55
Tabla 8: Balance de masa (Bn) del glaciar Charquini Sur expresado en milímetros equivalente agua (mm.eq.agua) desde septiembre del el 2006 hasta agosto del 2012.	59
Tabla 9: Coordenadas (UTM WGS84) de las balizas para el año 2013 con una precisión de 0.02 m.....	60
Tabla 10: Coordenadas (UTM WGS84) de las balizas para el 2013 con una precisión de 3 m	60
Tabla 11: Cuadro de zonas altitudinales del glaciar Charquini Sur.....	61
Tabla 12: Valores altitudinales de emergencia, nieve y balance de masa de las balizas. 66	
Tabla 13: Superficie de cada segmento de rango altitudinal del glaciar Charquini Sur....	67
Tabla 14: cálculo del balance de masa del Glaciar Charquini Sur.....	67
Tabla 15: Balance de masa del Glaciar desde el año 2006 hasta el 2013.	68
Tabla 16: Coordenadas de los puntos de Apoyo para las fotografías 144 y 145.....	82
Tabla 17: Coordenadas en mm de las marcas fiduciales de las fotografías aéreas del 2006.	84
Tabla 18: Coordenadas de los límites utilizados para generar el modelo Dem.	93
Tabla 19: Características técnicas del objetico canon EF 20mm/F2.8 utilizado en el trabajo.	98
<i>Tabla 20: Coordenadas x, y, z de la antena de las marcas de control instaladas sobre el glaciar Charquini Sur en WGS84 (donde Am representa la altura de la antena)....</i>	116
Tabla 21: Síntesis de comparación de las características de las focales.	117
Tabla 22: Lista de las fotografías tomadas en cada base fotográfica tomadas el año 2013.	118
<i>Tabla 23: Coordenadas de las bases fotográficas.</i>	119
Tabla 24: Síntesis de las características técnicas de las fotografías tomadas el 2013... 122	
Tabla 25: Ángulos delos ejes de rotación calculados.....	126
Tabla 26: Coordenadas de las marcas de control en coordenadas Orima para el 2013. 128	
Tabla 27: Vector de traslación para x, y, z.	128
Tabla 28: Coordenadas de las marcas de control en coordenadas Orima para el 2013. 129	
Tabla 29: Determinación de la exactitud sobre XYZ calculado sobre la fotografía del 2006 en coordenadas WGS84.....	137

Tabla 30: Determinación de la exactitud sobre XYZ calculado sobre la fotografía del 2013 en coordenadas WGS84.....	139
Tabla 31: Síntesis de resultados entre los objetivos de 50 mm y 15 mm.	144
Tabla 32: Ventajas y desventajas de los tipos de marcas utilizadas en este trabajo.	145
Tabla 33: Cálculo del balance de masa para el pit numero 1.....	159
Tabla 34: Cálculo del balance de masa para el pit numero 2.....	160
Tabla 35: Cálculo del balance de masa para el pit numero 3.....	161



Resumen

El presente trabajo es una contribución a estudios glaciológicos que se realizan en nuestro país por el proyecto GREAT ICE impulsado por el IRD, quienes vienen realizando un monitoreo continuo sobre algunos glaciares de la Cordillera Real, a partir de 1991.

Los glaciares en la actualidad reflejan un importante retroceso en respuesta al cambio climático de las últimas décadas, por lo que se considera a estas masas de hielo importantes indicadores climáticos. En este sentido, se calculó el balance de masa del glaciar de Charquini Sur durante el periodo 2006 - 2013 utilizando el método volumétrico, aplicando fotogrametría terrestre, para cuantificar el volumen perdido del glaciar durante los últimos siete años.

En una primera parte se describieron las condiciones geológicas del área de estudio así como la identificación y caracterización de la geomorfología utilizando fotografías aéreas tomadas en el año 2006 y generando de esta manera un mapa geomorfológico donde se muestran geoformas típicas de una región de alta montaña.

Seguido, se determinó el balance de masa mediante el método glaciológico en base a mediciones mensuales del glaciar. El método volumétrico fue aplicado para construir dos Modelos Digitales de Elevación que correspondieron a la superficie topográfica del glaciar en dos periodos distintos. El primero correspondió al año 2006 generado a partir de fotografías aéreas y el segundo al año 2013 mediante fotografías terrestres. Luego se calculó la diferencia volumétrica entre ambos modelos con lo que se pudo obtener el balance de masa correspondiente al periodo 2006 - 2013.

Finalmente se realizó una comparación entre los resultados obtenidos por los métodos glaciológico y volumétrico, encontrando una buena correlación entre ambos métodos. Pudiendo afirmar, que el método volumétrico mediante fotogrametría terrestre posee buena exactitud, confiable para futuros estudios glaciológicos y geológicos para movimientos de tierra e identificación de estructuras.

Palabras claves: fotogrametría, calibración, geomorfología, glaciología, balance de masa, Charquini.

Summary

This paper is a contribution to glaciology studies carried out in our country by the GREAT ICE project promoted by the IRD, who carried out a continuous monitoring on some glaciers of the Cordillera Real, from 1991.

Glaciers currently reflect an important decrease in response to climate change of the past few decades, so it is considered to these masses of ice important climate indicators. In this sense, was calculated Charquini South glacier mass balance over the period 2006-2013 using the volumetric method, applying terrestrial photogrammetry, to quantify the lost volume of the glacier during the last seven years.

In the first part described the geological conditions of the area of study as well as the identification and characterization of geomorphology using aerial photographs taken in 2006 and thereby generating a geomorphological map showing typical landforms in a region of high mountains.

Next, determined the mass balance using the glaciological method based on monthly measurements of the glacier. The volumetric method was applied to build two models digital elevation that corresponded to the topographic surface of the glacier in two different periods. The first corresponded to the year 2006 generated from aerial photographs and the second towards the year 2013 through terrestrial photographs. Then we calculated the volumetric difference between both models with what could get you the balance of mass for the period 2006-2013.

Finally, a comparison between the results obtained by the methods of glaciological and volumetric, finding a good correlation between both methods was made. And can say that the volumetric method using terrestrial Photogrammetry has good accuracy, reliable for future geological and glaciological studies for earthworks and identification of structures.

Keywords: photogrammetry, calibration, geomorphology, glaciology, mass balance, Charquini.

CAPITULO I: GENERALIDADES

1.1. Introducción.

El presente trabajo trata sobre el cálculo del balance de masa de un glaciar tropical, que es considerado como indicador climático y con una notable sensibilidad al clima actual, mediante la aplicación de la fotogrametría aérea y la implementación de la fotogrametría terrestre, donde a través de un par de fotografías de un mismo objeto tomadas desde dos puntos de vista diferentes se logra la visión en tercera dimensión y gracias a este fenómeno se obtiene la geometría del mismo, es decir, área, volumen, longitud, además de otras propiedades físicas que la fotografía capta del objeto y que un ojo entrenado puede interpretar como: forma, color, material, textura, etc.

Las mediciones fueron realizadas en el glaciar Charquini Sur que se halla sobre el macizo Charquini en la región de Milluni, donde se abordó la geología local profundizando principalmente en el aspecto geomorfológico ya que este tema está bastante descuidado en zonas de alta montaña. Se realizaron mediciones y cálculos con el fin de determinar el balance de masa del glaciar durante el periodo 2006 - 2013.

Se calculó el balance de masa del glaciar Charquini Sur utilizando el método glaciológico para el año hidrológico 2012 - 2013, valor con el cual se obtuvo el balance de masa total acumulado desde el año 2006 (en base información proporcionada por el proyecto *GREAT ICE*) hasta el año 2013.

Se generó un modelo Dem inicial a partir de fotografías aéreas tomadas el año 2006 utilizando la fotogrametría aérea. Se generó un modelo Dem final mediante la implementación de la fotogrametría terrestre a partir de fotografías terrestres tomadas en el mes de Julio del año 2013 del flanco Este glaciar Charquini Sur con una cámara

semi-métrica profesional calibrada. Para la generación de los Dem's, todas las fotografías en formato digital fueron trabajadas en los programas Erdas y ArcGis aplicando triangulación y restitución fotogramétrica. El cálculo del balance de masa para el periodo 2006 - 2013 mediante el método volumétrico fue obtenido mediante una sustracción de volumen entre el Dem del 2013 y el Dem 2006, a partir de esta diferencia se calculó el balance de masa del periodo 2006 - 2013.

Finalmente, se llevó a cabo una comparación de los resultados obtenidos utilizando el método glaciológico y volumétrico, con lo cual se determinó que el método de fotogrametría terrestre es confiable y puede ser utilizado para llevar a cabo un monitoreo sistemático del glaciar con gran eficiencia.

1.2. Antecedentes.

El estudio de glaciares en nuestro país es llevado a cabo por el programa *GREAT ICE* (Glaciers et Ressources en Eau d'Altitude Indicateurs Climatiques et Environnementaux, por sus siglas en francés) del IRD (Institut de Recherche pour le Développement, por sus siglas en francés), con el apoyo del IHH (Instituto de Hidráulica e Hidrología), el IGEMA (Instituto de Investigaciones Geológicas y del Medio Ambiente), el SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidráulica) y COBEE (Compañía Boliviana de Energía Eléctrica), que fueron iniciados sobre los glaciares de Chacaltaya y Zongo a partir de 1991. Estos glaciares fueron elegidos y equipados por su importancia en términos de recursos hídricos, hidroeléctricos, proximidad y accesibilidad desde la ciudad de La Paz durante todo el año. Las mediciones son llevadas a cabo mensualmente con el fin de lograr determinar su fluctuación en el tiempo, sin embargo y debido a la desaparición del glaciar de Chacaltaya (efectiva en 2008) el glaciar Charquini Sur ubicado en el cerro Charquini, fue equipado durante el ciclo hidrológico 2002 - 2003 para ser monitoreado en reemplazo del glaciar Chacaltaya.

Uno de los estudios más importantes realizados sobre el glaciar Charquini Sur fue llevado a cabo por Rabatel (2005), quien realizó estudios sobre las morrenas mediante liquenometría logró determinar los diferentes procesos de avance y retroceso del glaciar desde la pequeña edad de hielo ocurrida en el año 1860 (PEH). Otro estudio importante a nivel regional fue llevado a cabo por el doctor A. Socuro (Soruco, 2012),

quien estudió las fluctuaciones glaciares en la Cordillera Real y sus efectos hidrológicos en la ciudad de La Paz aplicando fotogrametría aérea.

La fotogrametría terrestre es una variante de la fotogrametría aérea aplicada en la actualidad en arquitectura, ingeniería civil, medicina, industria automotriz para la modelización de objetos en tres dimensiones, sin embargo, esta técnica nunca ha sido desarrollado en nuestro país, motivo por el cual no se encontraron antecedentes o estudios similares.

1.3. Planteamiento del problema.

Actualmente el proyecto *GREAT ICE* cuenta con once años de mediciones para determinar el balance de masa del glaciar de Charquini Sur (desde septiembre del 2002 hasta el presente) empleando el método glaciológico, sin embargo hasta ahora dichos balances nunca han sido validados o confrontados con otro método independiente (Ej. el método hidrológico y/o el método volumétrico).

El método volumétrico mediante fotogrametría, constituye el método de validación de los balances de masa por excelencia (Soruco et al., 2009), (Thibert et al., 2008) ya que se realiza un muestreo en toda la superficie del glaciar a diferencia del método glaciológico el cual se limita a muestrear el glaciar en pocas áreas de medición.

1.4. Planteamiento de objetivos.

6.2.1. Objetivo general.

El presente trabajo tiene por objetivo aplicar la fotogrametría terrestre como método volumétrico para determinar el balance de masa del glaciar Charquini Sur.

6.2.2. Objetivos Específicos.

- Describir y analizar las características geológica-glaciológicas del área de estudio y la influencia producida por sus procesos en la fluctuación del glaciar Charquini Sur (ente el 2006 y el 2013).
- Describir los procesos que se utilizan en fotogrametría para su aplicación al estudio de glaciares.
- Definir una metodología fotogramétrica para el cálculo del balance de masa mensual y anual del glaciar Charquini Sur.

- Realizar la validación de los balances de masa existentes en el glaciar Charquini Sur para determinar la consistencia de la información.

1.5. Hipótesis.

La fotogrametría terrestre es una técnica que permite realizar mediciones precisas a la superficie del Glaciar Charquini Sur para determinar su evolución (avance o retroceso) en los últimos siete años.

1.6. Justificación.

El estudio de glaciares tiene una importancia relevante en la actualidad, ya que el retroceso que sufren desde mediados del siglo XIX se ha convertido en un problema de carácter mundial, donde el derretimiento continuo de masas de hielo puede llegar a producir primeramente un aumento del nivel del mar en todo el mundo, ocasionando inundaciones costeras y pérdida de terreno principalmente en territorios insulares¹, poniendo en peligro la infraestructura vital que sostiene el bienestar socioeconómico de sus comunidades (IPCC², 2001), En segundo lugar puede afectar la disponibilidad de agua dulce para consumo y riego (IPCC, 2001). Estudios realizados en la India indican que la disponibilidad per cápita de agua dulce descenderá aproximadamente desde los 1.900 m³ en la actualidad a 1.000 m³ en 2025, y no solo en la india sino también en todo el mundo (IPCC, 2001).

En nuestro país los glaciares se desarrollan sobre las Cordilleras Occidental y Oriental, en la Cordillera Oriental el 80 % de los glaciares son pequeños con un área inferior a los 0.5 km² de superficie (Jordan, 1991).

De acuerdo a Ramírez (2001) los glaciares "pequeños" son los más vulnerables a una acelerada extinción para los próximos años debido a su elevada sensibilidad al cambio climático. Uno de los casos más conocidos en la última década, corresponde a la dramática desaparición del Glaciar de Chacaltaya. Por lo que este estudio y los resultados que se obtengan ayudaran a la toma de decisiones y estrategias para la preservación a futuro y/o previsión en términos hídricos de las ciudades de La Paz y El Alto.

¹ Un territorio Insular es un conjunto de islas, rocas, islotes y arrecifes rodeados de agua.

² Es el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, según sus siglas en inglés), o Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

1.7. Aportes.

Este trabajo aportará al conocimiento geológico local mediante una recopilación bibliográfica de trabajos realizados, particularmente en la geomorfología de zonas de alta montaña con un mapa geomorfológico y el desarrollo del método volumétrico que se constituirá en la primera aplicación de la técnica de fotogrametría terrestre a un estudio glaciológico en nuestro país.



CAPITULO II: MARCO TEORICO

2.1. Glaciar.

2.1.1. Definición de glaciar.

Un glaciar es una gruesa masa de hielo que se origina en la superficie terrestre por acumulación, compactación y recristalización de la nieve, muestra evidencias de flujo en el pasado o en la actualidad, normalmente de color transparente con matices azulados, se desplaza sobre el sustrato de roca debido a la plasticidad que posee, a la gravedad y al derretimiento en la parte baja (glaciares templados), influenciado por fenómenos climáticos (precipitaciones, temperatura, humedad, intercambios energéticos) en su fluctuación de retroceso o avance.

Los glaciares del mundo son variados y pueden clasificarse según su forma (de valle, de nicho, campo de hielo etc.), régimen climático (tropical, temperado o polar) o condiciones térmicas (base fría, base caliente o politermal) su gran mayoría se encuentra en zonas cercanas a los polos, y también pero en menor proporción en zonas tropicales en regiones montañosas.

Estudios realizados por Francou et al. (2004) e impulsados por la IRD, consideran a un glaciar como un objeto hidrológico cuya masa cambia a corto plazo en función de las características del clima.

2.1.2. Partes de un glaciar.

Según Francou et al. (2004), un glaciar está constituido principalmente de las siguientes partes:

Zona de acumulación.- es la región más alta del glaciar donde la nieve se acumula durante la época de lluvias, para luego convertirse en neviza y finalmente en hielo glaciar, gracias a la compactación de capas de acumulación sucesivas (Figura 1).

Zona de ablación.- También llamada región de desplazamiento, que es la zona que se encuentra a menor altitud y donde ocurre principalmente la ablación (por fusión o sublimación) del hielo durante el verano austral.

Línea de equilibrio ELA (Equilibrium Line Altitude, por sus siglas en inglés).- Es una línea teórica que permanece más o menos constante en el tiempo pero pudiendo variar en altitud año tras año (en función del balance de masa del glaciar de cada año respectivamente), marca el límite entre la zona de acumulación (donde el glaciar acumula masa) y la zona de ablación (donde el glaciar pierde masa). En otras palabras es el lugar donde la pérdida de masa es igual a la ganancia de masa de un glaciar en un periodo determinado. La variabilidad de las curvas hipsométricas³ dependerá principalmente de las variaciones meteorológicas año tras año. Bajo un clima cálido la ELA tendrá la tendencia a subir en altitud, mientras que bajo un clima frío la ELA tendrá la tendencia a bajar en altitud. Una ELA a gran altitud nos indica una región con un área reducida área de acumulación de masa (importante área de ablación glaciar), por lo tanto obtendremos un balance de masa negativo en el glaciar. Por el contrario, una ELA a baja altitud nos indicara una región con una gran área de acumulación de masa y un área reducida de ablación glaciar, por lo tanto obtendremos un balance de masa positivo en el glaciar (Figura 1).

Grietas.- Son fracturas diagonales que se forman en los bordes de la masa de hielo debido a su desplazamiento irregular sobre el lecho rocoso, esto ocurre porque las partes laterales en contacto con el sustrato están sometidas a fricción que frena su avance por lo tanto se deslizan más lentamente en relación a la parte central.

Morrenas.- Son geoformas típicas de regiones montañosas, están constituidas de material rocoso producto de la erosión y deposición glaciar. Este tipo de geoformas, nos indican la fluctuación glaciar de una época determinada, y por lo tanto el clima de la región en una época determinada (Figura 1).

³ Diagrama de curvas utilizado para indicar una proporción de superficie con relación a la altitud.

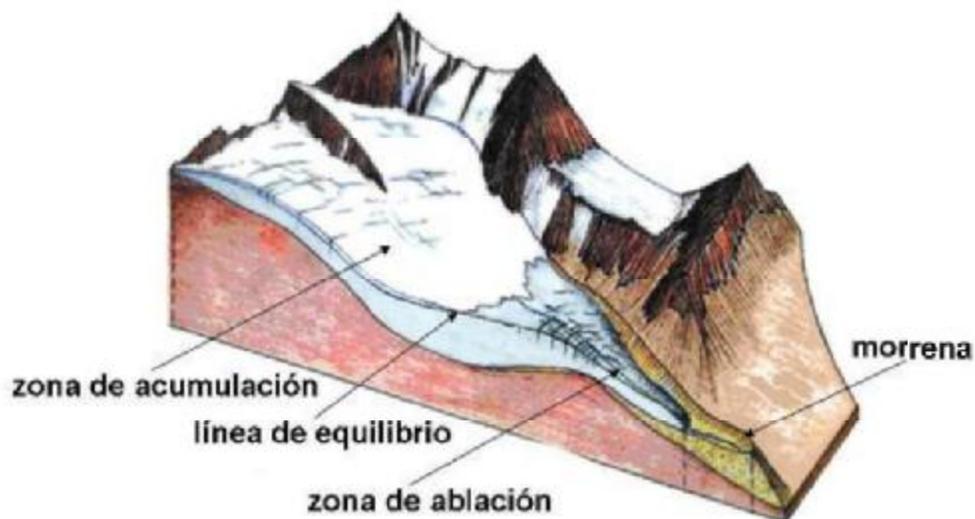


Figura 1: Diagrama del corte longitudinal de un glaciar donde se observan las zonas de acumulación y ablación y otros elementos como la línea de equilibrio y morenas. (World Glacier Monitoring Service (WGMS)).

2.2. El balance de masa de un Glaciar.

El cálculo del balance de masa de un glaciar representa la ganancia y pérdida de la masa de hielo en equivalente de agua⁴ (eq.agua), durante un periodo de tiempo determinado (Lliboutry, 1956) obtenida a partir de mediciones repetidas por un método directo (método glaciológico o método volumétrico) o un método indirecto (balance hidrológico).

Cuando se habla de balance de masa también se habla de sensibilidad del glaciar a las variaciones climatológicas, ya que la evolución de un glaciar va de la mano con la evolución del clima (Vincent, 2002).

2.3. Métodos de estimación del balance de masa de un glaciar.

Los métodos tradicionales utilizados para la determinación de balance de masa de un glaciar están dados por métodos directos e indirectos.

2.3.1. Método glaciológico.

El método directo glaciológico estima la pérdida o ganancia de masa de un glaciar en un periodo de tiempo determinado a partir de mediciones de campo sobre: balizas en la zona de ablación y pozos/perforaciones de nieve/hielo en la zona de acumulación. El

⁴ Se refiere a la densidad de la nieve y del hielo transformada a la densidad del agua, común mente se expresa en mm. a manera de mm.eq.agua.

balance de masa específico es obtenido empleando el método glaciológico tradicional (Paterson, 1994):

$$\beta n_{glaciológico} = \int_{S_c} h_n dS + \int_{S_a} h_n dS$$

βn = Balance neto específico del glaciar

S_c = Área de la zona de ablación

S_a = Área de la zona de acumulación

B_n = Balance ponderado por zona

2.3.2. Método hidrológico.

El método indirecto hidrológico, es obtenido a partir de la medición de la precipitación (P en metros por año) y la medición del caudal de fusión del glaciar (D en m³ por año) utilizando la ecuación de continuidad (Sicart et al., 2007):

$$\beta n_{hidrológico} = P - 1/S_g [D - (S - S_g) C_e P]$$

βn = Balance de masa del glaciar

S_g = Superficie del glaciar en m²

S = Superficie de la cuenca hidrológica en m²

P = Precipitación

D = Caudal

C_e = coeficiente de escurrimiento de la superficie no cubierta por hielo

Se debe tomar en cuenta que esta ecuación no considera la sublimación del hielo (ablación), ya que este parámetro es casi nulo comparado con la fusión del glaciar por lo tanto no es tomado en cuenta en la determinación del balance de masa de un glaciar mediante este método (Sicart et al., 2007).

2.3.3. Método volumétrico.

Este método directo consiste en estimar el balance de masa general (nieve, neviza o hielo) de un glaciar mediante mediciones. Este método es calculado realizando la diferencia de superficies del glaciar de dos o más épocas diferentes, empleando modelos digitales de elevación (Dem⁵, por sus siglas en ingles), que pueden ser obtenidos mediante restitución manual fotogramétrica, una estéreo correlación

⁵ Modelo Digital de Elevación (Digital Elevation Model).

automática (imágenes satelitales o fotografías aéreas), de datos topográficos (GPS⁶ o estaciones totales) o mediante datos LIDAR⁷ aerotransportados. Para la determinación del balance de masa volumétrico entre 2 estados del glaciar, es necesario conocer la altitud del estado inicial del glaciar (Z_1), así como la altitud del estado final (Z_2) utilizando la siguiente formula:

$$\Delta m_{vol} = m_2 - m_1 = \iint_{S_2}^{S_1} \left[\int_{Z_1(x,y)}^{Z_2(x,y)} \rho(x,y,z) dz \right] dx dy$$

Donde Δm_{vol} corresponde a la variación de masa, ρ a la densidad del hielo (0.9 gr/cm³), S_1 al estadio inicial y S_2 al estadio final. Finalmente el balance de masa neto volumétrico se obtiene dividiendo la variación de masa (Δm_{vol}) por la superficie promedio (S_{m}) del glaciar entre la 2 épocas (Thibert et al., 2008):

$$h_{vol} = \frac{\Delta m_{vol}}{S_m} = \frac{\rho}{S_m} \sum_{i=1}^Q \Delta h_j S_{grid}$$

Donde Q es el número de mallas de la grilla interpolada, Δh_j es la variación de altura de cada nodo j y S_{grid} es la superficie de cada malla de la grilla de restitución (grilla de remuestreo de la interpolación).

2.4. Los glaciares tropicales y su repartición a nivel mundial.

Según Kaser et al. (1996), se llaman glaciares tropicales aquellos que están ubicados dentro de la zona tropical terrestre que está definida como la intersección de tres características climáticas del globo terrestre: la región comprendida por la zona de convergencia intertropical, la región donde la amplitud térmica diurna es superior a la amplitud térmica anual ΔT (diurna) > ΔT (anual) y la región astronómica comprendida entre los trópicos de Cáncer y Capricornio (Figura 2)

⁶ Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System). Sistema de navegación basado en satélites.

⁷ (Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging). Permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto.

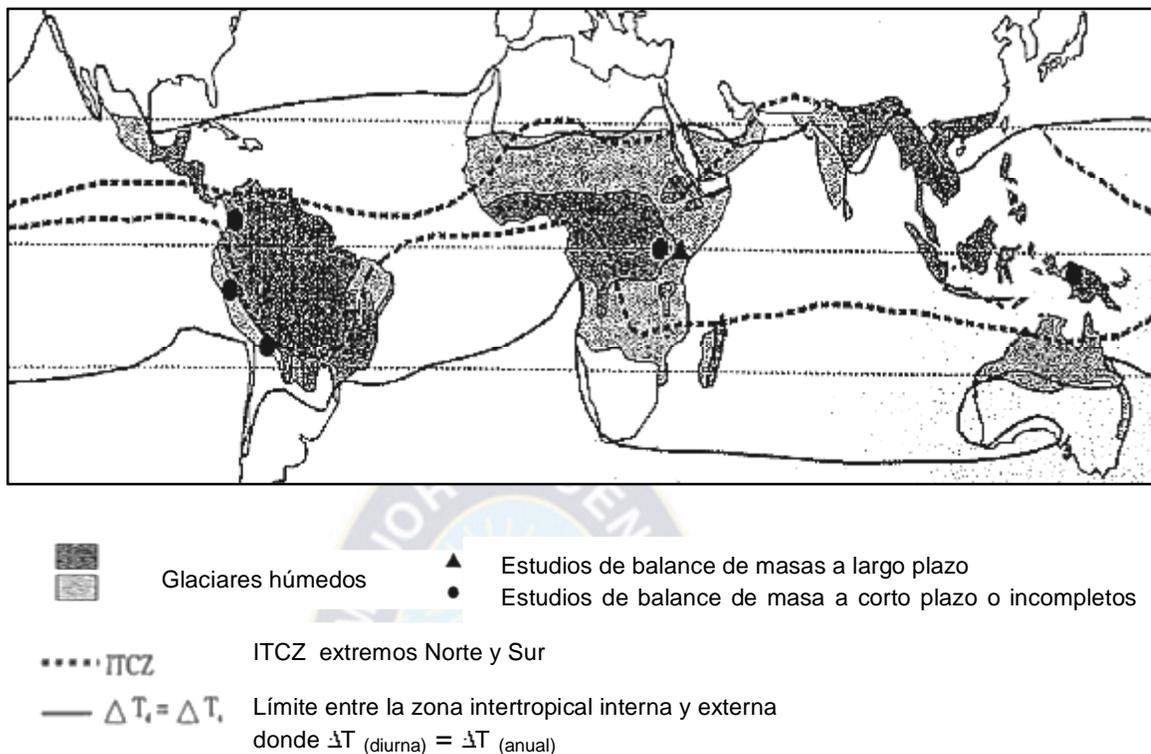


Figura 2: Distribución de glaciares tropicales en el mundo, (Kaser et al., 1996).

Los glaciares tropicales que se hallan dentro esta zona pueden ser de tipo húmedo (trópico interno, glaciares del Ecuador) o húmedo-seco (trópico externo, glaciares de Bolivia, Perú), ocupando un área de $2,5 \times 10^3 \text{ Km}^2$ que corresponde al 4,6% del total de glaciares de montaña y el 0,16% de los glaciares en todo el mundo de esta superficie el 99,68% se encuentra en América del Sur, 0,18% en África y 0,12% en Papuasias-Nueva Guinea, en la actualidad se creen extintos esos últimos glaciares (Vincent, 2002). Del total de glaciares en América del sur el 71,1% se encuentra en Perú y el 20,4% se encuentra en Bolivia (Tabla 1).

Los glaciares de montaña de los trópicos, son considerados componentes sensibles del medio ambiente y ameritan atención en el contexto del cambio climático global y como recursos hídricos, principalmente en regiones marcadas por una estación húmeda y una estación seca, tal cual es el caso para Bolivia.

Región	Sup. [Km ²]	Sup. [%]	Año	Referencias
Sudamérica				
Perú	1972.0	71.28	1970	[Jordan, 1991]
Bolivia	562.0	20.32	1980	[Jordan, 1991]
Ecuador	112.8	4.08	1970	[Jordan, 1991]
Colombia	108.5	3.92	1950	[Jordan, 1991]
Venezuela	2.7	0.10	1950	[Jordan, 1991]
Total	2758	99.696		
África del este				
Kilimanjaro	3.3	0.12	1989	[Hastenrath, 1997] en Kaser 1999
Ruwenzori	1.7	0.06	1990	[Kaser, 1999]
Mt Kenya	0.4	0.01	1993	[Hastenrath, 1995] en Kaser 1999
Total	5.4	0.1952		
Oceanía				
Irian Jaya	3.0	0.11	1988	[Peterson, 1994] en Kaser 1999
Total	3.0	0.1084		
TOTAL	2766.4	100		

Tabla 1. Distribución de glaciares en la zona tropical. (Kaser, 1999).

2.5. Los glaciares sobre la Cordillera Oriental en Bolivia.

La Cordillera Oriental es el elemento estructural principal y ampliamente dominante a nivel local, es un enorme bloque de edad esencialmente paleozoica, de rocas sedimentarias y metamórficas, la Cordillera Real que es una prolongación de la Cordillera Muñecas atraviesa el país de Bolivia (Montes de Oca, 2005), con una altura promedio de 5000 msnm, que nace a partir del río Sorata extendiéndose hacia el valle del río La Paz cubriendo una distancia de 200 Km para continuar con el nombre de Tres Cruces (Figura 3).

Un estudio realizado por Jauregui (1969) muestra que el paquete sedimentario del área de estudio se encuentra deformado debido al desarrollo de una intrusión batolítica que habría levantado, volteado y roto estas unidades litológicas paleozoicas.

Argollo (1994) hace una recapitulación de la evolución glaciológica y geomorfológica de los valles de la cordillera oriental que presentó fases complejas de acumulación y erosión glaciar desde hace 40000 años, también describe las glaciaciones ocurridas en la Cordillera Oriental en tres etapas:

- La primera, corresponde a glaciaciones antiguas del Cuaternario Inferior donde las regiones de pie de monte de la cordillera oriental habrían recibido depósitos

producto de glaciaciones antiguas incluidas la glaciación Kaluyo denominadas Formaciones Antiguas.

- La segunda, llamada Cuaternario Medio, donde los piedemonte de la Cordillera Real fueron un sitio de una sucesión compleja de fases de erosión y alternancia entre avances y retrocesos glaciares debido al desarrollo de dos glaciaciones importantes: Sorata, que dejó depósitos morrénicos bien conservados a lo largo de la Cordillera Real formando potentes arcos, situándose a más de 4200 m de altura, afectadas por deformaciones tectónicas; y Choqueyapu que se desarrollaron sobre valles previos, dejando arcos morrénicos de gran extensión que se evidencian mejor en la Cordillera de Apolobamba.
- La tercera llamada Cuaternario Reciente donde la topografía del pie de monte ya fue estructurada debido a los avances y principalmente a retrocesos glaciares recientes con desarrollo de depósitos morrénicos correspondientes a la última glaciación estudiados por Rabatel (2005), en el glaciar Charquini Sur.

La Cordillera Real posee varios picos importantes con altitudes considerables como el Huayna Potosí 6088 m.s.n.m., el Mururata 5755 m.s.n.m., el Illimani 6400 m.s.n.m., el Chacaltaya 5340 m.s.n.m. (Figura 3), sobre los cuales se desarrollan varios glaciares citados en la Tabla 2, esta tabla muestra la superficie cubierta por los glaciares en las diferentes regiones de la Cordillera Real.

Nombre	Área
Illampu - Ancohumá	106.33 Km ²
Chearoco - Chachacomani	97.05 Km ²
Negruni - Condoriri	40.51 Km ²
Huayna Potosi - Chacaltaya	24.39 Km ²
Hampaturi - Taquesi	11.76 Km ²
Mururata	17.33 Km ²
Illimani	29.65 Km ²

Tabla 2: Zonas glaciares en la Cordillera Oriental o Real en Bolivia y sus superficies (Jordan, 1991).

El área de estudio se encuentra sobre el intrusivo Charquini, zona que al igual que las serranías colindantes como el Huayna Potosí y Chacaltaya, se encuentran controladas por un fuerte tectonismo que afectó esta zona como consecuencia del emplazamiento ígneo de los batolitos del Huayna Potosí y Cuticucho, produciendo un sistema de fallas

y diaclasas que tienen orientación general que va desde N60°E a N70°E (Jauregui, 1969).

Los efectos ocurridos en esta zona como resultado de la acción glacial, son pertenecientes netamente a una glaciación alpina donde se observan circos, artesas glaciares, valles colgantes, crestas dentadas, etc.

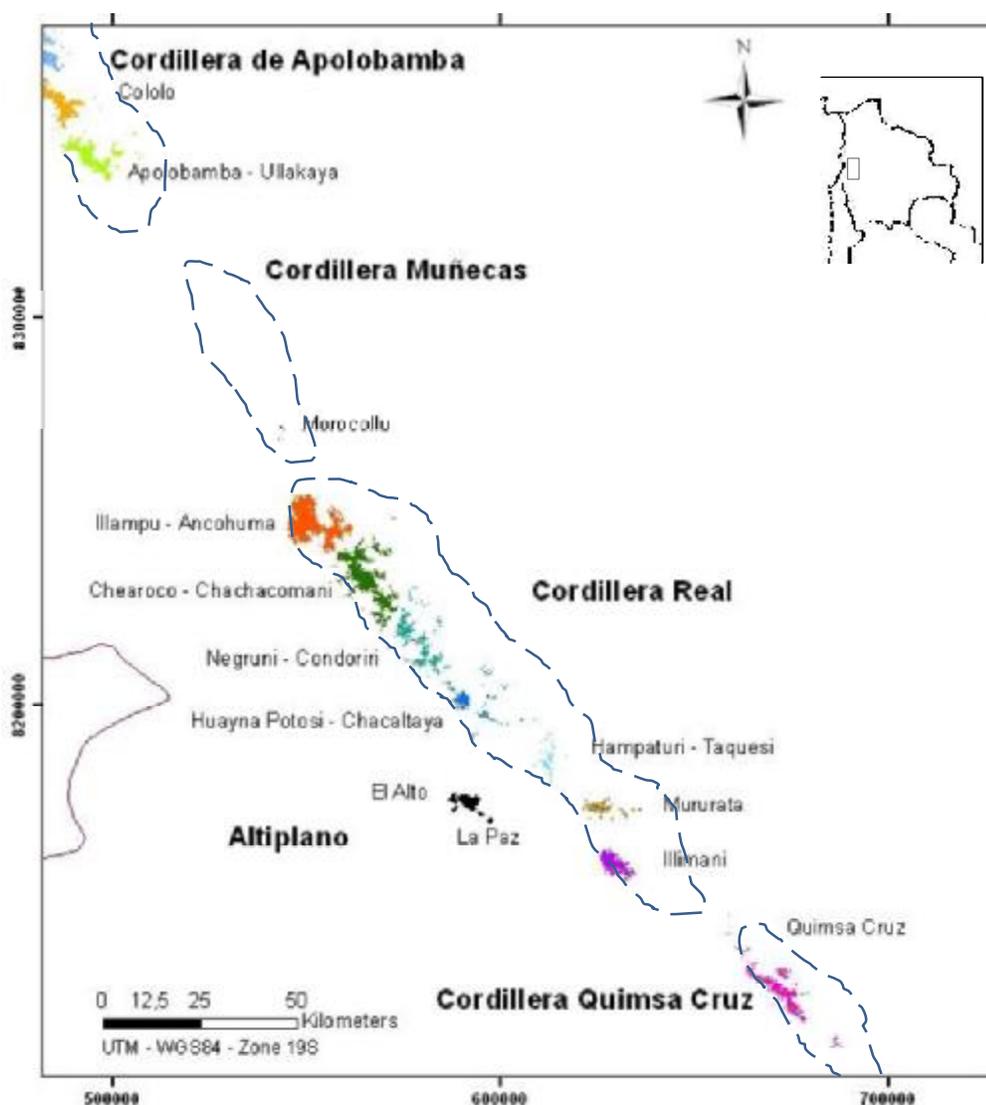


Figura 3: Principales glaciaciones en la Cordillera Real (Jordan, 1991).

2.6. Fluctuación de los glaciares desde la pequeña edad del hielo.

Estudios realizados con el fin de hacer una reconstrucción de cuencas, del paleoclima, de ambientes de sedimentación y ambientes glaciológicos, han tenido importantes

aportes en los últimos 15 años, con resultados que han permitido afinar las reconstrucciones ya mencionadas.

De esta manera se determinó el último máximo glaciar LGM (Last Glacial Maximum, por sus siglas en inglés) una masa glaciar que pudo generar una morrena terminal, donde la más baja en Bolivia fue datada aproximadamente hace 34 Ka (Smith et al., 2005). Esta fecha es ligeramente anterior a la formación del lago Minchin (32 Ka - 30 Ka). En la región del Titicaca, el LGM está datada entre 26 Ka - 22 Ka periodo que parece haber sido más húmedo con una temperatura que va desde los 5 °C a los 8 °C más frío que el actual (Abott, 2000).

El retroceso inicia hace 21 Ka - 19 Ka (Smith et al., 2005) donde el clima se hizo más caliente y húmedo favoreciendo a formación de lagos, como ser el Tauca (18 Ka - 13 Ka) seguido del lago Coipasa (13.4 Ka - 11.5 Ka), la formación de este último lago coincide con el evento "Dryas reciente" (fue una breve fase de enfriamiento climático a finales del pleistoceno que tuvo una duración de 1.3 Ka \pm 70 años, entre 12.7 Ka y 11.5 Ka atrás), este evento fue identificado en nuestro país por Thompson et al. (1998) en testigos de hielo en el nevado Sajama y por en el nevado Illimani.

El periodo Holoceno para nuestro país está caracterizado por un clima seco y cálido que provoca un incremento de la evaporación de aguas y decrementando el nivel local de los lagos, generando de este modo la aparición de salares, se identificó la región del lago Titicaca como la zona con mayor intensidad de este proceso (6 Ka - 5 Ka).

Dataciones realizadas por Rabatel (2005) a morrenas de diferentes glaciares al norte de la cordillera del Quimsa Cruz utilizando la técnica de liquenometría y siguiendo como guía la especie *Rhizocarpon Geographicum* s.l.⁸, determinaron la existencia de 10 cordones morrénicos principales que abarcan desde la PEH (Pequeña Edad de Hielo) hasta la actualidad (Figura 4). Estas morrenas están divididas en dos grupos: morrenas de avance y de retroceso, en donde las morrenas de avance son de mayor tamaño, están compuesta por bloques y granos finos y con una marcada continuidad mientras que las morrenas de retroceso tienen menor tamaño, poseen granulometría que va desde cantos a granos finos, raramente continuas. En la Figura 4 podemos observar los 10 cordones morrénicos representados por triángulos donde M1, M3 y M6

⁸ Especie de liquen crustáceo que se desarrollan particularmente en paredes rocosas.

corresponden a morrenas de avance y M2, M4, M5, M7, M8, M9, M10 morrenas de retroceso.

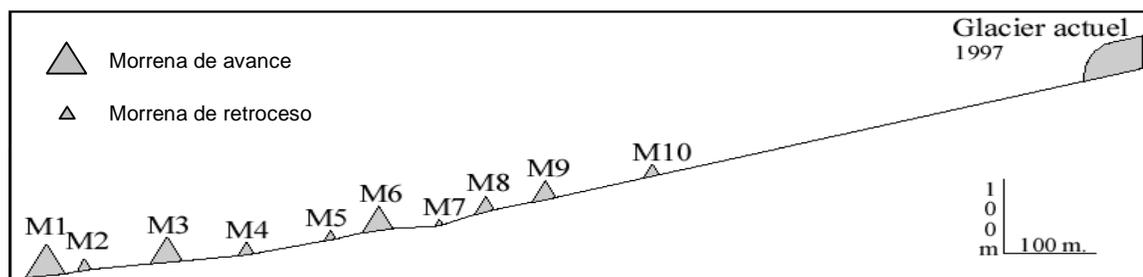


Figura 4: Esquema de perfil de las 10 morrenas frontales estudiadas por Rabatel (2005)

La Tabla 3 presenta una síntesis de edades para las morrenas.

Morrena	Tipo de morrena	Edad datada	Edad estimada
M1	Morrena de avance	1642 - 1700	1686 ±14
M2	Morrena de retroceso	1688 - 1716	1703 ± 2
M3	Morrena de avance	1720 - 1752	1734 ±12
M4	Morrena de retroceso	1745 - 1775	1757 ± 4
M5	Morrena de retroceso	1753 - 1793	1772 ± 6
M6	Morrena de avance	1781 - 1821	1808 ±10
M7	Morrena de retroceso	1803 - 1835	1825 ±10
M8	Morrena de retroceso	1834 - 1866	1843 ± 9
M9	Morrena de retroceso	1835 - 1885	1871 ± 9
M10	Morrena de retroceso	1896 - 1921	1912 ± 9

Tabla 3: Distribución temporal de las morrenas desde la PEH (Rabatel, 2005)

Estas dataciones indican que la morrena M1 corresponde al máximo de la PEH datada entre 1642 y 1700, donde M2 corresponde a una morrena de retroceso datada entre 1688 y 1716, M3 morrena de avance datada entre 1720 y 1752, M4 entre 1745 y 1775, finalmente M5 datada entre 1753 y 1793 en fase de retroceso. M6 fue determinada como una morrena de avance datada entre 1781 y 1821. M7 como morrena de retroceso entre 1803 y 1835. M8 1834 y 1866. M9 entre 1835 y 1885. M10 entre 1896 y 1921.

La Figura 5 muestra la disposición geométrica de las diferentes morrenas desarrolladas en el glaciar Charquini Sur visto en planta.

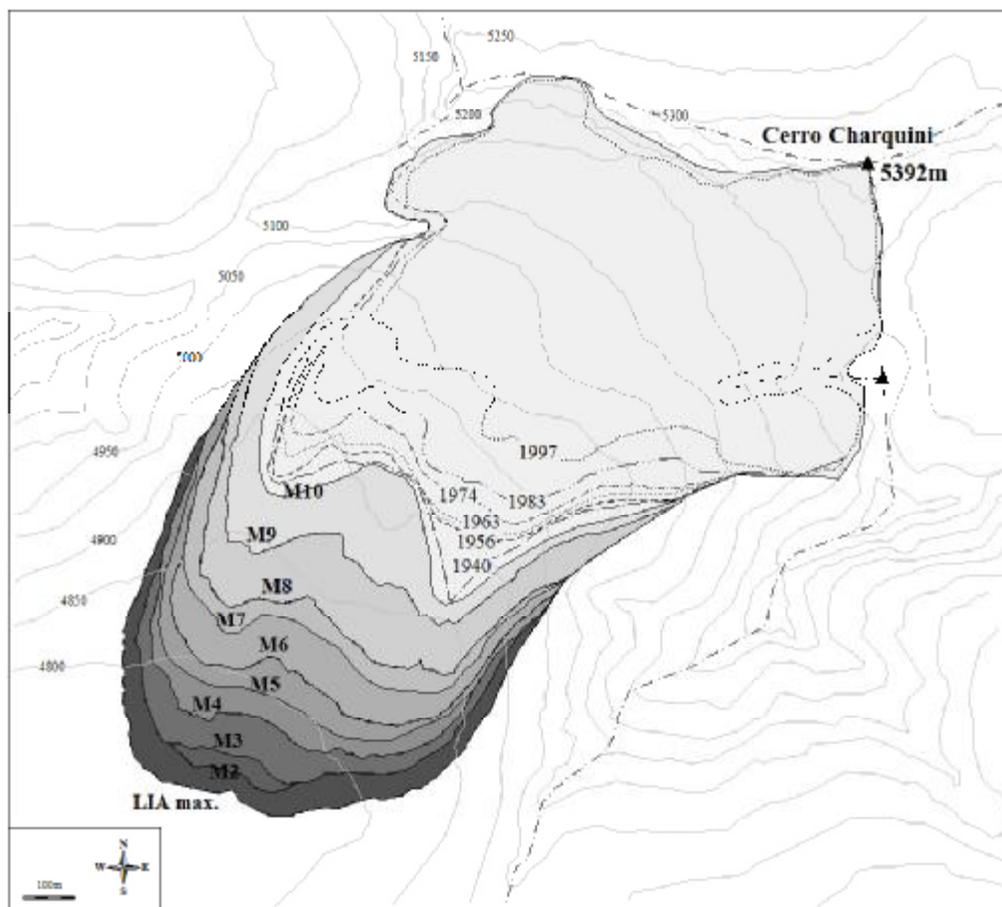


Figura 5: Evolución de la superficie del glaciar Charquini Sur después del máximo PEH limitadas por las morrenas M1 hasta M10 (Rabatel, 2005)

2.7. Fluctuación de los glaciares en los últimos 50 años.

Según Parry et al. (2008) las proyecciones indican que las reservas de agua almacenada en los glaciares del mundo disminuirían durante este siglo, reduciendo así la disponibilidad de agua durante los periodos calurosos y secos (debido a un cambio estacional del caudal fluvial, a un aumento de las aportaciones invernales al total anual, y a reducciones de los caudales menores) en regiones dependientes del deshielo en las principales cordilleras montañosas, en las que vive actualmente más de la sexta parte de la población mundial .

De acuerdo a los estudios de Vuille et al., (2008), a partir de 1980 la temperatura del planeta ha continuado incrementándose hasta nuestros días, por lo que la mayoría de glaciares del mundo o han desaparecido completamente o están bajo amenaza de extinción. Este fenómeno afecta a prácticamente todas las regiones del mundo desde los trópicos, pasando por las latitudes medias hasta los polos.

De acuerdo con los estudios realizados por Soruco et al. (2009) la Cordillera Oriental y otras zonas del mundo evidencian un retroceso dramático de los glaciares, el cual se ha acelerado a partir del año 1975.

El inventario realizado por Jordán en 1991 ha permitido determinar las superficies de hielo sobre la Cordillera Oriental en Bolivia y tener las primeras vistas globales de todos los glaciares, de este modo se identificaron 1826 glaciares con una superficie total del 581.6 Km² en el año de 1975, donde el 80 % poseía un tamaño inferior a los 0.5 Km².

2.7.1. Caso Glaciar Chacaltaya.

El glaciar Chacaltaya es un claro ejemplo de las consecuencias producidas por calentamiento global que ocurre en la actualidad, donde su volumen de hielo habría disminuido en más del 80% en menos de 40 años desde el año 1963 (Ramirez, 2001).

Entre los años 1963 y 1983 el volumen del glaciar se había reducido en 58 %, es decir de 5,5 millones a 2,3 millones de metros cúbicos. Y de 1983 al año 2003 el volumen bajó el 98 %, de 2,3 millones a 119 mil metros cúbicos. Las Figuras 6 y 7 muestran la evolución del glaciar del Chacaltaya desde 1940 hasta el 2001. (Ramirez et al., 2011), se predijo que el glaciar estaba en vías de extinción completa entre los años 2010 y 2015 pero la desaparición completa del glaciar aconteció el año 2008 (J.E. Sicart, comunicación personal)

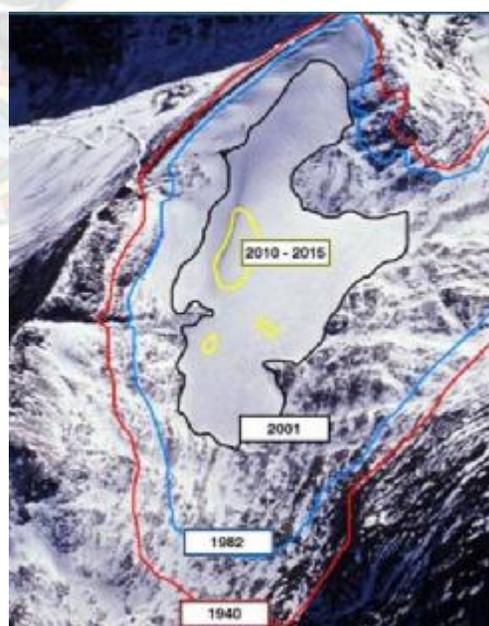


Figura 6: Glaciar Chacaltaya vista desde el flanco Norte del cerro Farellon, los polígonos muestran el retroceso desde 1940 hasta el 2001 y se especulaba su extinción hasta el 2010 - 2015 (Ramírez, 2001)

Se determinó que la pérdida de masa de hielo se había acelerado en los últimos 20 años de forma dramática, donde según los resultados de investigaciones científicas, el mayor deshielo del Chacaltaya ocurrió en los años 1997 - 1998 durante el fenómeno de El Niño.



Figura 7: Fotografías del glaciar Chacaltaya, con la ayuda de una directriz que va desde el tope hasta la base glaciar donde se aprecia claramente el retroceso desde 1940 hasta el 2005 (Ramírez, 2007)

2.7.2. Caso Glaciar Illimani.

Estudios realizados por el proyecto "Fortaleciendo la capacidad y desarrollando estrategias de adaptación a los fenómenos de cambio climático en Comunidades de la Cordillera Real de Los Andes Centrales de Bolivia" sobre fotografías aéreas obtenidas de los años 1963, 1975, 1983 y 2009 de la región del Illimani provistas por el Servicio Nacional de Aerofotogrametría de la Fuerza Aérea Boliviana (FAB) determinaron que en los últimos 46 años el glaciar Illimani había perdido aproximadamente el 21.3 % de su superficie y que entre 1976 y 2006 se había perdido el 45 % de la superficie de glaciares sobre la Cordillera Real del país (Ramírez et al., 2011).

En el caso concreto del nevado Illimani, ha pasado de 16,4 km² a 14.8 km², entre 1985 y 2006 mostrando una reducción del 9,7 %, según publica el experto Martín Vilela en el estudio Glaciares Andinos Recursos y Cambio Climático.

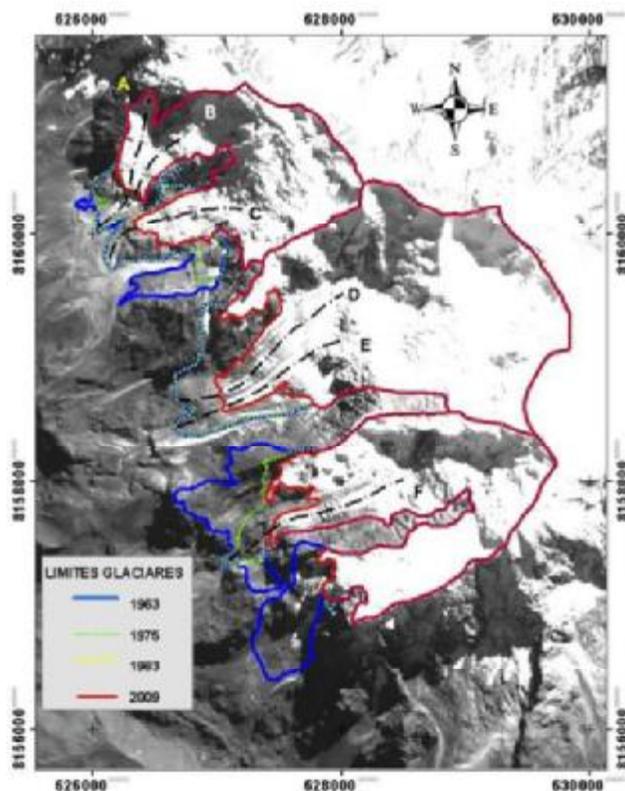


Figura 8: Evolución del glaciar Illimani en los últimos 50 años, donde los polígonos rojos corresponden al contorno glaciar para el 2009 y el contorno azul al borde frontal en el año 1963 (Ramírez, et al., 2010)

2.8. La evolución del clima durante las últimas décadas en la zona intertropical.

La evolución del clima ocurrido sobre la zona intertropical en las últimas décadas ha sido tópicamente de varios estudios que determinaron un aumento de temperatura entre 1950 - 1994 particularmente en los Andes centrales de 0.15 °C por década (Vuille et al., 2003) y de 0.10 °C por década entre 1939 y 2006 (Vuille et al., 2008). Otros estudios determinaron un aumento de 0.35 a 0.39 °C por década entre 1951 y 1999 (Mark, 2002).

Según investigaciones y el diagnóstico de un modelo atmosférico realizados entre 1950 - 1998 se determinó un aumento de precipitaciones entre Ecuador y la parte

central de Perú, pero una disminución para el caso de Bolivia (Vuille et al., 2003). Otro estudio realizado por Haylock (2006) entre 1960 y 2000 obtuvo similares resultados.

Estudios sobre la humedad del planeta realizados por Vuille et al. (2008) terminaron que en las últimas décadas la actividad convectiva⁹ en la parte intertropical interna fue aumentando volviéndose más húmeda mientras que la zona intertropical externa se fue haciendo más seca debido a una reducción en la actividad convectiva (Figura 2).

Según la IPCC (2001) durante estas últimas décadas los responsables de este cambio en el clima son los océanos ya que pueden acumular y transportar el calor por grandes distancias impulsados por corrientes marinas, estudios realizados en el Océano Pacífico entre 1955 - 1995 determinan que la temperatura promedio habría aumentado en 0.31 °C entre los 0 y 300 metros de profundidad y de 0.06 °C entre los 300 y 1000 m de profundidad. Otro estudio realizado por Stephens et al., (2001) entre los años 1948 - 1998 revela que la temperatura promedio del Océano Pacífico había aumentado a mediados de la década de 1970 este evento coincide con el cambio de presión a nivel del mar ocurrido también a mediados de la década de 1970. Según Guilderson et al. (1998), estos cambios parecen ser responsables del aumento de la frecuencia y la intensidad del fenómeno de El Niño.

Según Vergara (2007), el retroceso acelerado de los glaciares tropicales es una situación "crítica" en Bolivia, donde la disponibilidad de agua ya está en riesgo. Debido a que los glaciares en los Andes Bolivianos en su mayoría son pequeños son susceptibles a la extinción por lo que son considerados como uno de los ecosistemas más vulnerables al cambio climático.

2.9. Los fenómenos ENSO.

El fenómeno ENSO (El Niño Southern Oscillation, por sus siglas en inglés) es una variación de la presión atmosférica a lo largo del Pacífico ecuatorial con consecuencias climáticas a nivel mundial, existiendo una fase caliente o El Niño y una fase fría o La Niña (Trenberth, 1997).

⁹ Movimiento ascendente del aire provocado principalmente por el efecto de calentamiento que ocasiona la radiación solar en la superficie terrestre.

Durante una situación normal los vientos alisios¹⁰ provenientes del Este impulsan la capa superficial del Océano Pacífico hacia el Oeste donde se reúne en una "piscina caliente o warm pool" situada entre la Polinesia e Indonesia, la cual da lugar a una intensa evaporación que alimenta la zona ascendente de la convección atmosférica, dando lugar a la circulación de Walker¹¹. Según Merle (2006) debido a este efecto las aguas frías profundas emergen a lo largo de la costa peruana conocida como la corriente de Humboldt¹² (Figura 9).

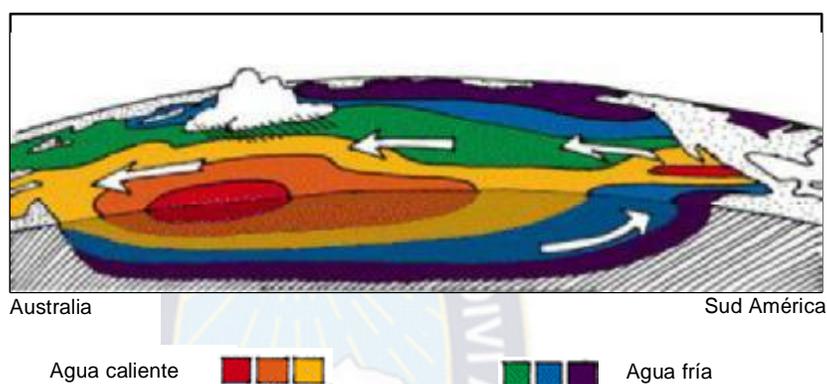


Figura 9: Condiciones normales. Donde La termoclina¹³ en el margen Este está muy cerca de la superficie del océano y muy cerca al margen occidental del continente americano pero en el margen Oeste esta es más profunda. (Gulf of Marine Research Institute, 2012).

De acuerdo a Merle (2006) durante el fenómeno del Niño, los vientos alisios bajan intensidad debido a una disminución de la gradiente de presión entre el pacífico oriental y occidental, debido a esto se produce un equilibrio y la "piscina caliente" se desplaza hacia el Este, desde allí las aguas calientes fluyen hacia las costas del Perú y Ecuador por una contracorriente. Entonces las zonas de fuerte convección o de presiones bajas se desplazan hacia el este. Mientras que la disminución de la gradiente de presión entre la polinesia y el Norte de Australia continua, debilitando los vientos alisios y contrariamente reforzando la entrada de aguas calientes hacia el continente

¹⁰ Son vientos constantes que soplan regularmente en los océanos Pacífico y Atlántico, desde las zonas tropicales hacia el ecuador.

¹¹ Es un modelo conceptual del flujo de aire en los trópicos en la atmósfera que se debe a las diferencias en la distribución del calor entre el océano y la tierra.

¹² Es una corriente oceánica originada por el ascenso de aguas profundas y, por lo tanto, muy frías, que se produce en las costas occidentales de América del Sur, conocida también con el nombre de corriente peruana.

¹³ Es una capa dentro de un cuerpo de agua donde la temperatura cambia rápidamente con la profundidad o altura.

sudamericano. El ciclo típico de un fenómeno El Niño dura alrededor de 18 meses (Figura 10).



Figura 10: Condiciones del fenómeno de El Niño. Donde la termoclina en el margen Este está muy cerca de la superficie del océano y muy cerca al margen occidental del continente americano pero en el margen Oeste esta es más profunda y más cercana a Australia. (Gulf of Marine Research Institute, 2012).

Para Merle (2006) durante el fenómeno de "La Niña" se observa un reforzamiento de la situación normal con una intensificación de la emergencia de aguas frías en superficie a lo largo de las costas peruanas, por lo cual las aguas se hacen más frías, las precipitaciones se intensifican en el Oeste pero se reducen hacia el Este manifestándose como sequía para las costas sudamericanas. Cuando los vientos alisios son reforzados, las precipitaciones provenientes del Atlántico y de la cuenca amazónica se vierten al centro del continente americano (Figura 11).

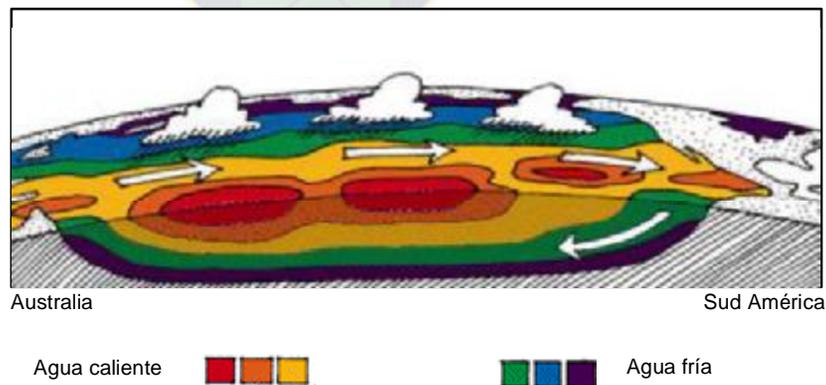


Figura 11: Condiciones del fenómeno de La Niña. Donde la termoclina está cerca de la superficie en el Este del océano y mucho más profunda en el occidente. Las precipitaciones se producen en el occidente del océano. (Gulf of Marine Research Institute, 2012).

Vuille et al., (2000) afirma que para Bolivia durante el fenómeno del Niño las precipitaciones son deficitarias, mientras que durante el fenómeno de la Niña las precipitaciones se vuelven excedentarias (Tabla 4).

	El Niño	La Niña
Precipitaciones	Deficitarias	Excedentarias
Temperatura	Incremento	Decremento
Balance de masa glaciar	Negativo	Positivo o cercanos a cero

Tabla 4: Características de los fenómenos climatológicos, El Niño, La Niña.



CAPITULO III: DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO

3.1. Presentación del Área.

3.1.1. Ubicación.

El cerro Charquini (Figura 12) es un pequeño cerro que se levanta en la región de Milluni, ubicado en el cantón Milluni, sección Achocalla, Tercera de la provincia Murillo del departamento de La Paz sobre la faja de la Cordillera Oriental o Real de los Andes a 32 Km al NNE de La Ciudad de La Paz, próximo al cerro Huayna Potosí.

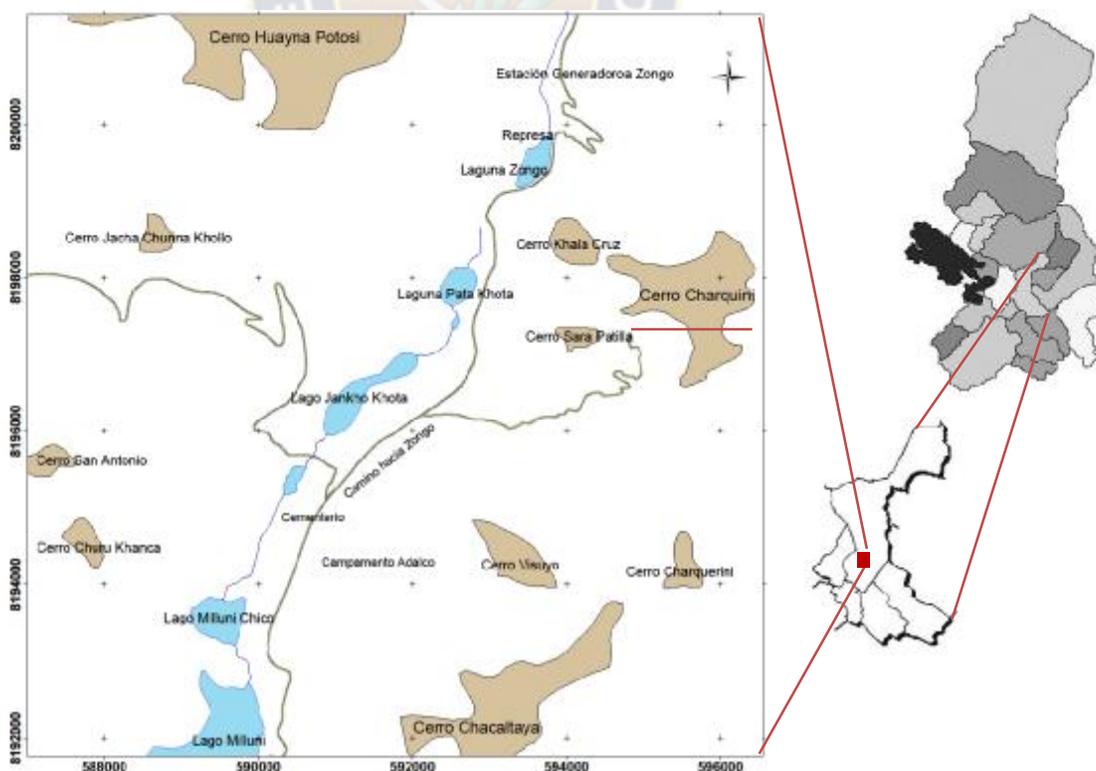


Figura 12: Mapa de ubicación del cerro Charquini en la región de Milluni.

3.1.2. Límites y Superficie.

El cerro Charquini abarca un área de 16 Km² (Figura 13) comprendida entre las coordenadas UTM 8199500 – 8195500 Norte y 593200 – 597200 Este (Elipsoide WGS 1984, Datum WGS84), presenta una cobertura de hielo distribuida en cinco glaciares (ver 3.2.1). Limita hacia el Nor-Oeste con el Cerro Khala Cruz, hacia el Sur-Oeste el Cerro Sora Patilla, hacia el Nor-Este el Cerro Estana Punta.

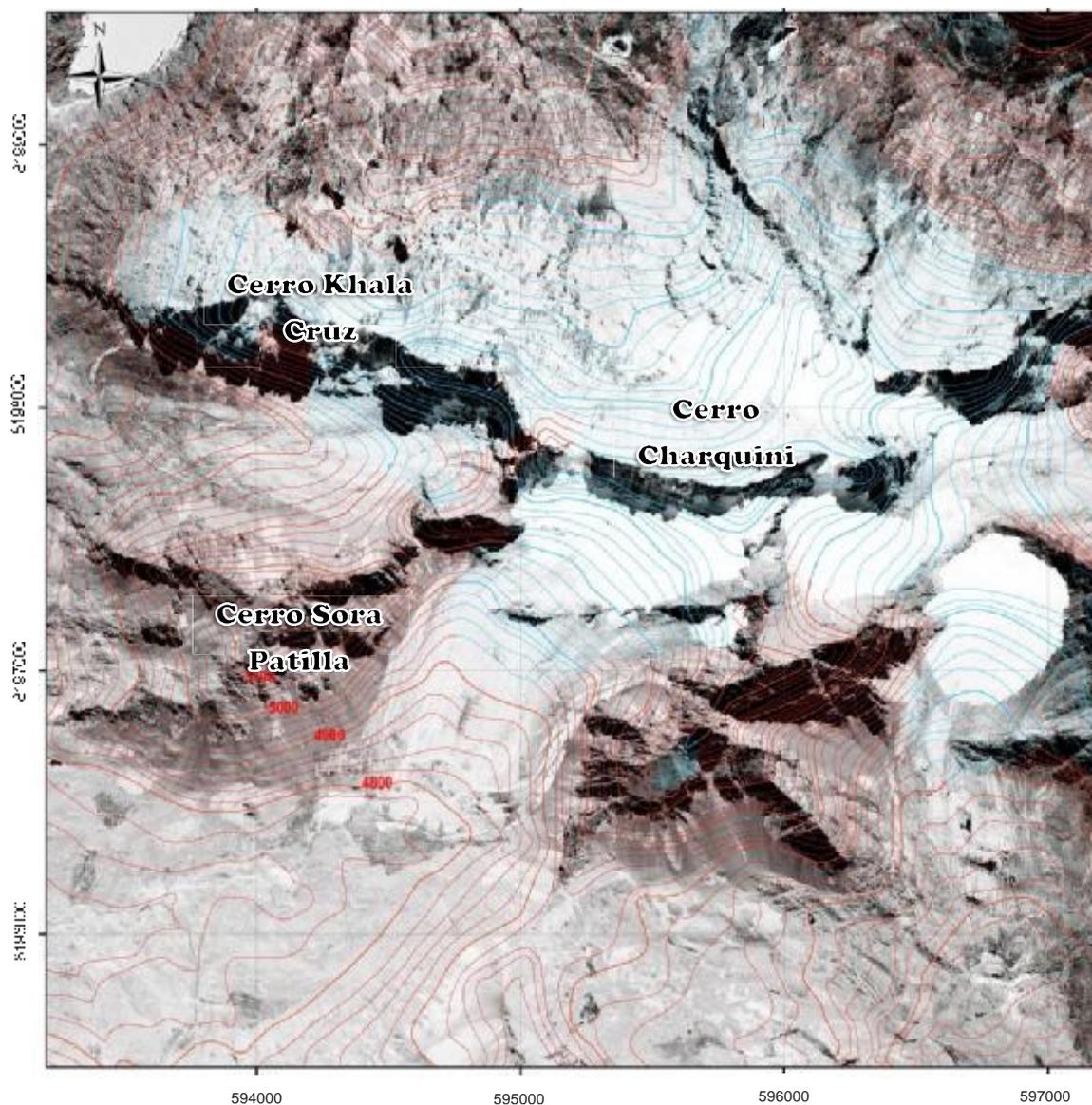


Figura 13: Fotografía aérea orto-rectificada del macizo Charquini con curvas de nivel a partir de la Fotografía 144 del vuelo 2006)

El área de estudio comprende el glaciar Charquini Sur, uno de los cinco glaciares del cerro Charquini (Figura 16) el cual está siendo monitoreado por el proyecto *GREAT*

ICE. El glaciar Charquini Sur fluye en dirección SE - NO, presenta una superficie inferior a los 0.5 km² se encuentra rodeado hacia el norte por paredes rocosas casi verticales (Figura 14) que limitan el glaciar Charquini Sur con el Norte.

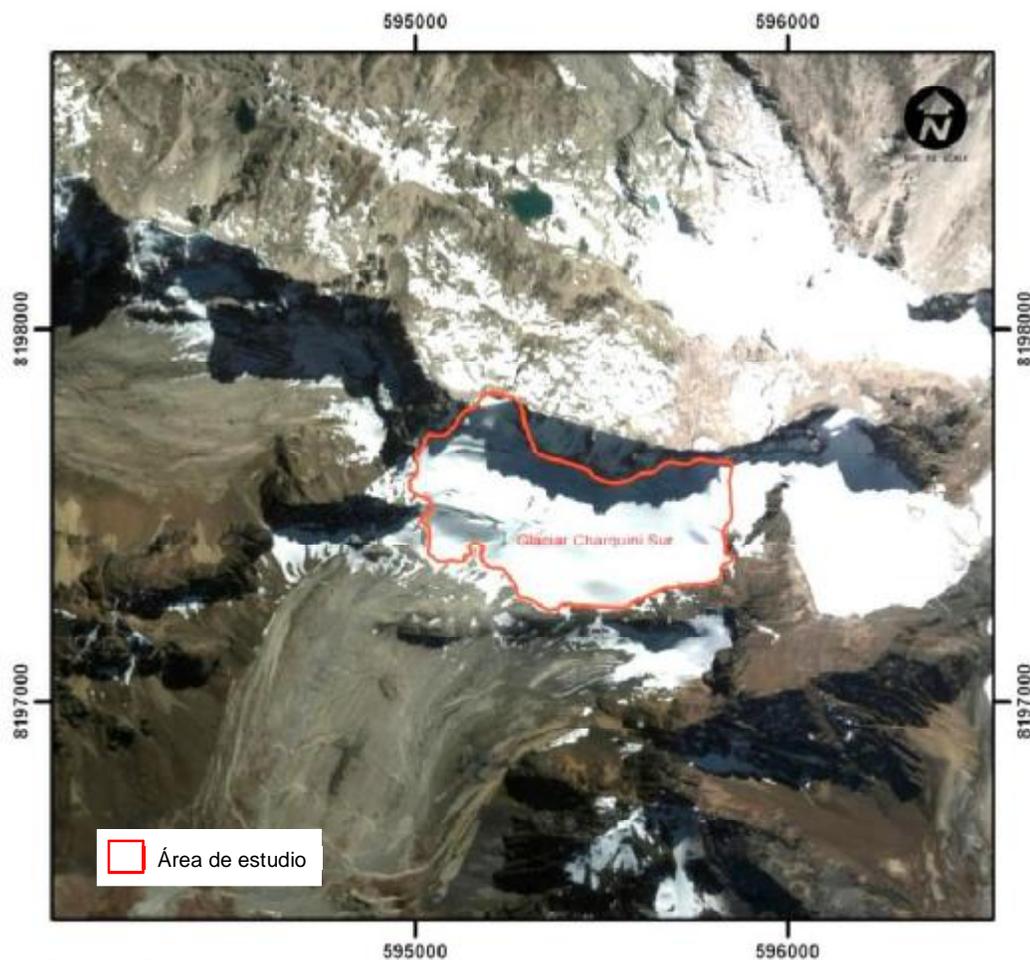


Figura 14: Imagen Satelital del Glaciar Charquini Sur Datum WGS-84 (Google Earth 2012)

Actualmente este glaciar se encuentra equipado por un primer conjunto o red de balizas¹⁴ que se instalaron en la superficie del glaciar en agosto de 2002, en agosto de 2003 esta red fue expandida para posteriormente en septiembre de 2004 llegar a una cantidad total de veinte balizas (Rabatel et al., 2006). A la fecha posee una red de quince balizas las cuales son medidas mensualmente para estimar el balance de masa anual. Además, sobre este glaciar dependiendo del año hidrológico se realizan entre 3 a 4 pozos/perforaciones de nieve/hielo (la profundidad puede estar entre 1 m

¹⁴ La Baliza o estaca es un tubo de plástico PVC insertada en el hielo, utilizada para medir la altura de la nieve y de hielo sobre el glaciar.

hasta los 4 m dependiendo de la cantidad de nieve acumulada en el año hidrológico) para determinar la acumulación neta del glaciar.

3.1.3. Acceso.

El acceso al área es siguiendo hacia el Norte de la ciudad de La Paz por la autopista que une la ciudad de La Paz con El Alto, a 4 Km se toma un desvío hacia la derecha siguiendo el carril de subida hacia la zona de Villa Adela, se continua el rumbo pasando por siete lagunas y finalmente tomando la bifurcación derecha del camino hacia el valle de Zongo. Siguiendo esta ruta 5 Km antes de llegar al nevado Huayna Potosí existe un desvío hacia el Este que se interna sobre una pequeña cuenca que continua atravesando morrenas hasta llegar a las faltas del glaciar Charquini Sur.

3.2. Marco Geológico.

En el área de estudio la pila sedimentaria está constituida por depósitos ordovícicos de la Formación Amutara. Suprayacen depósitos de la Formación Cancañiri y de la Formación Uncía correspondientes al sistema Silúrico. Se tiene un cuerpo granotideo correspondiente a la Formación Intrusivo Huayna Potosí que se dispone en contacto tectónico con la formación Amutara. Finalmente tenemos la formación de depósitos glaciares, periglaciares y fluvio-glaciares típicos de un ambiente de montaña formados durante el Cuaternario (Figura 15).

El estudio realizados por Martínez (1972) dice que esta zona está constituida por los restos de una cadena hercínica intracratónica, entre el escudo Brasileño y el Altiplano.

Según McBride (1983) la formación del intrusivo Huayna Potosí se habría producido por dos pulsos de magmatismo granítico, el primero durante Triásico medio a tardío (225 - 202 Ma) y el segundo en el oligoceno terminal y mioceno (28.4 - 19.2 Ma), ambos dominios plutónicos fueron yuxtapuestos con poca o ninguna superposición de área, a lo largo de una faja lineal que define el límite interior del arco magmático andino central.

De acuerdo con Sánchez (1977) el macizo Charquini es un cuerpo ígneo batolítico correspondiente al intrusivo Huayna Potosí (217.9 Ma \pm 6.6 Ma) de edad triásica que afectó estructuralmente a las formaciones precedentes, en este caso las formaciones Amutara, Catavi y Uncía.

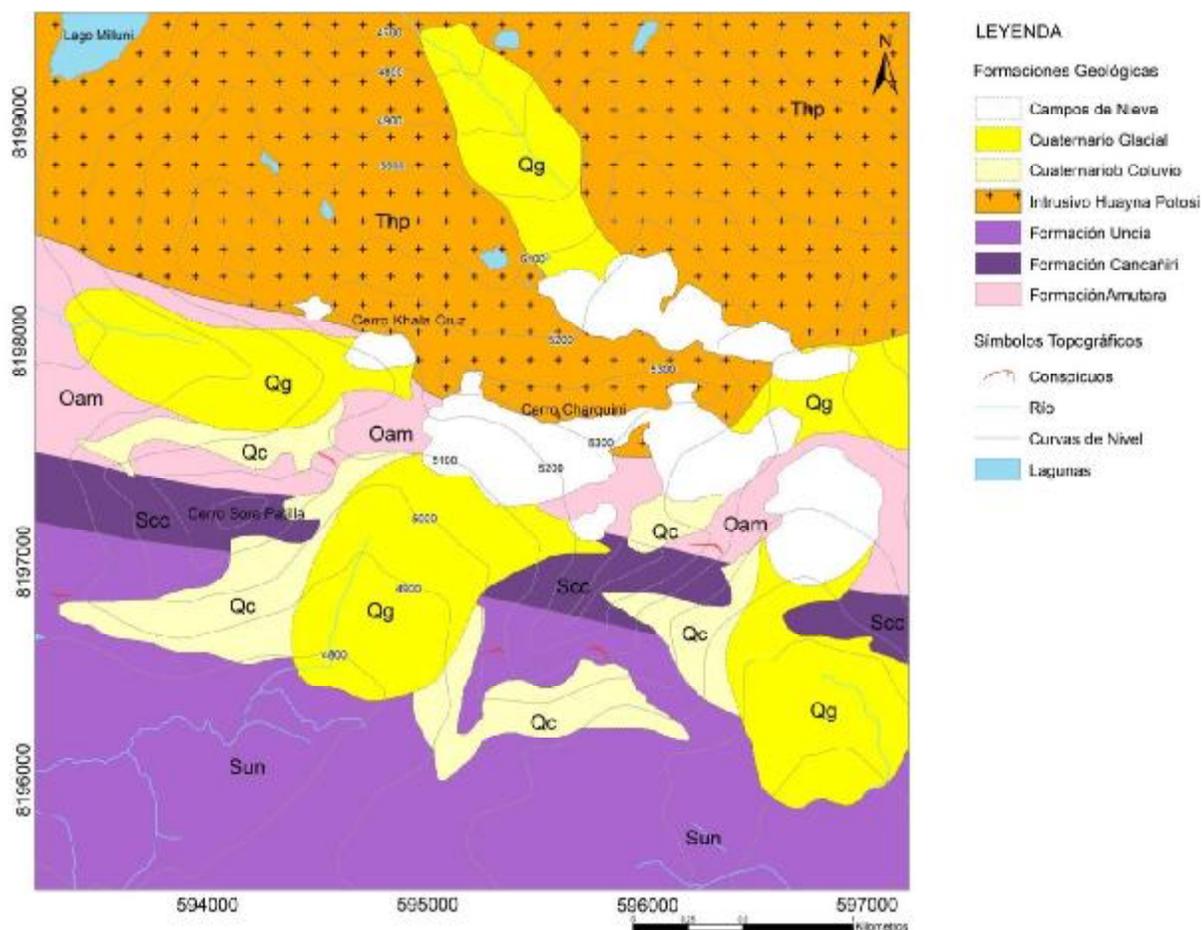


Figura 15: Mapa Fotogeológico en base al mapa geológico del área de estudio.

Entonces según Fernandez et al. (1995) se puede decir que las unidades sedimentarias precedentes fueron intensamente afectadas por un tectonismo de carácter regional, dando lugar tanto a la formación del cerro Huayna Potosí como al cerro Charquini.

3.2.1. Geomorfología.

El paisaje del macizo del Charquini (Figura 17) presenta fuertes pendientes que forman crestas agudas e irregulares, con una elevación de 5392 m.s.n.m. desarrolla cinco glaciares (Figura 16) donde el relieve fue esculpido principalmente por procesos glaciares, periglaciares fuertemente influenciados por procesos climatológicos.

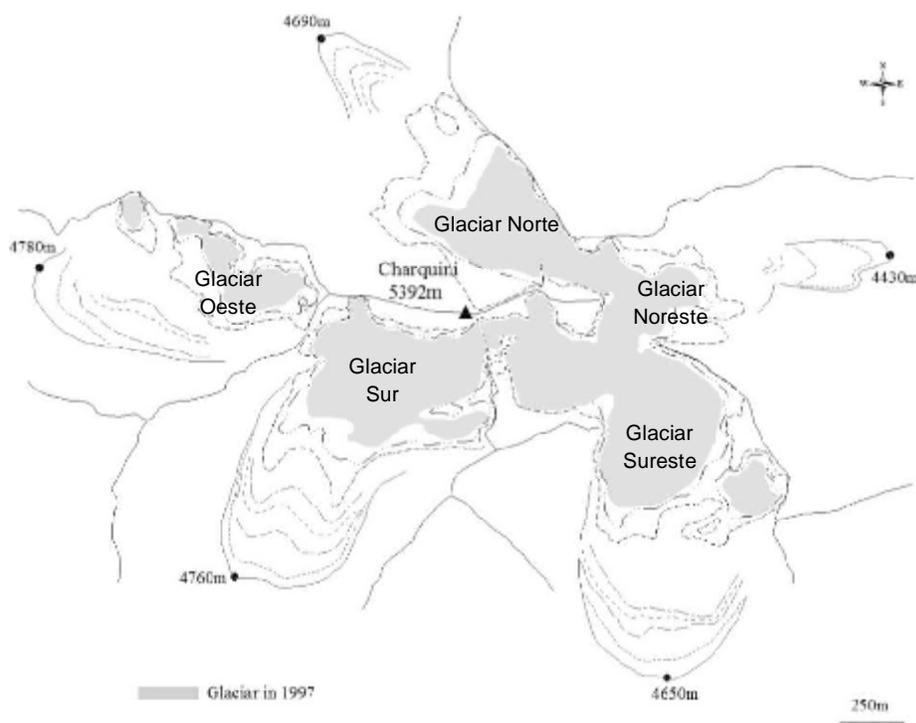


Figura 16: Esquema de los 5 glaciares del macizo Charquini (Rabatel, 2005).

La acumulación de hielo de estos glaciares son pequeñas masas situadas en las cabeceras de sus valles sobre anfiteatros con paredes escarpadas, según Gutierrez (2009) pertenecen al tipo "glaciar de circo" ya que se localizan en un área montañosa.

Los factores principales involucrados al modelamiento del relieve que se desarrollan en esta zona de alta montaña son los siguientes:

- El factor tectónico, cuyas fuerzas han logrado deformar, plegar y fallar la corteza terrestre, produciendo un levantamiento tectónico relativamente rápido que convirtió esta zona en un relieve positivo de alta pendiente.
- El factor litológico que concierne a la dureza alta o baja, el color, granulometría, etc. de las rocas aflorantes, influye en el desarrollo de las geoformas ya que es atacado por el factor erosivo.
- El factor erosivo, es un conjunto de procesos físicos y químicos que degradan y modelan el relieve de las rocas, para esta zona principalmente es el agua.



Figura 17: Fotografía del glaciar Charquini Sur tomada desde su valle glaciar al sur.

La meteorización física es el principal agente que modela el relieve en la zona mientras que la química pasa a segundo plano por la ausencia de organismos o disolución de compuestos debido a un ambiente frío. La velocidad en que las rocas se meteorizan y la velocidad de transporte son muy variables, dependiendo de la naturaleza de las rocas, del clima y de la pendiente (Gutierrez, 2009).

La meteorización que está en función de variaciones abruptas de temperatura, produce la dilatación y contracción de las rocas aflorantes produciendo la desescamación¹⁵, y el dislocamiento de bloques móviles. El color de la roca es un factor a considerar ya que según Derrau (1978) una roca oscura llega a absorber mayor calor, siendo esta más sensible a su dilatación y posterior rotura que una roca de color claro. En el área de trabajo este criterio corresponde a rocas sedimentarias que presentan por lo general tonos oscuros, principalmente las lutitas que resultan ser las más fragmentadas; mientras que los granitos por poseer un tono más claro no son afectados en gran medida por este proceso. El cerro Charquini presenta estos dos tipos de fragmentación, el Glaciar Charquini Norte presenta rocas graníticas de tonalidad clara donde la meteorización física no es tan severa mientras que en el glaciar Charquini Sur afloran rocas sedimentarias que debido a su tonalidad oscura presentan relieves más suaves producto de una intensa meteorización. Se evidenció el proceso de desmenuzamiento¹⁶ principalmente al norte del área de estudio donde la litología es granítica, ya que debido a su estructura granular tiende a disgregarse a manera a granos de azúcar; este proceso se intensifica sobre fragmentos y bloques de granito.

¹⁵ Es el descascarillado de la roca en láminas de uno o varios cm de espesor

¹⁶ Es la disgregación de los componentes de la roca que está dada por la acción de la variación térmica.

La meteorización física también actúa en la roca por medio del agua que penetra dentro las grietas posteriormente y debido a la temperatura que disminuye por debajo de los 0° C el agua pasa a fase sólida convirtiéndose en hielo ejerciendo presiones considerables sobre las paredes de la grieta, según Derrau (1978) el agua en estado sólido aumenta su volumen en aproximadamente 9%, este proceso es conocido con el nombre de gelifración, produciendo el engrosamiento de espacios vacíos y la profundización de la fragmentación de la roca formando bloques angulosos. Este proceso se desarrolla sobre rocas aflorantes en el área de estudio (véase Anexo 2) siendo más efectivo en sectores con fuerte pendiente ya que sumando a la gravedad se produce la caída de bloques pendiente abajo, algunas veces de grandes dimensiones como se puede observar en la Figura 92, los fragmentos producto de este proceso se depositan llegando a formar ya sea conos de derrubios o canchales (véase 3.2.1.2.2.).

Dentro los procesos que modifican el relieve existen los:

- Procesos Glaciares.
- Procesos Periglaciares.
- Procesos Fluvio-Glaciales.

3.2.1.1. Procesos Glaciares.

Los procesos glaciares son aquellos donde el glaciar actúa como agente erosivo y de transporte, su movimiento es lineal regido por la topografía, durante su paso va arrancando material del sustrato para luego depositarlo pendiente abajo llegando a formar depósitos glaciares sin estratificación y de considerable volumen, conocidos con el nombre de morrenas.

3.2.1.1.1. Geoformas debidas a procesos de erosión glaciar.

Los factores más importantes que afectan la intensidad de los procesos erosivos glaciares son los inherentes al propio sistema glaciar, las características litológicas, estructurales y la geometría del sustrato rocoso.

Las geoformas generadas por este proceso encontradas en el área de estudio son:

- Circos Glaciares.
- Rocas Aborregadas.
- Valle Glaciar.

3.2.1.1.1. Circos Glaciares.

Es una geoforma característica formada por erosión glaciár (Figura 18), es una pequeña depresión semicircular o semielíptica, dominada por paredes o escarpes verticales que esta o ha estado ocupada por hielo con presencia de un till glaciár hacia la base (Gutierrez, 2009).

Cada uno de los cinco glaciares del cerro Charquini se desarrollan sobre un circo glaciár respectivamente, el glaciár Sur, Sureste y Noreste presentan conexión a través de sus aristas. Estos glaciares desarrollan en su base un fondo de bajo Angulo que alberga pequeños lagos y bofedales. Las masas de hielo de estos circos son pequeñas presentan geometrías irregulares y asimétricas siendo la de mayor volumen la del Charquini Sur debido a su topografía, al lecho rocoso y al aporte de nieve en época de lluvias.



Figura 18: Fotografía de un pequeño circo glaciár adyacente al borde Este del Glaciár Charquini Sur.

3.2.1.1.2. Rocas aborregadas.

De acuerdo con Derrau (1978) son rocas aflorantes pulidas con ondulaciones y estrías a manera de abolladuras, se desarrollan en zonas que han estado cubiertas por masas de hielo, donde el flujo glaciár que transporta clastos por arrastre va tallando el basamento rocoso, formando en su base depresiones que luego son ocupadas por lagos o bofedales (Figura 19), resultado de la acumulación postglaciár en estos bajos fondos sobre excavados.

Visto desde un corte longitudinal estas geoformas desarrollan un flanco de pendiente baja en dirección opuesta al movimiento glaciár (Figura 19) que con frecuencia es pulida y estriada y el flanco opuesto con una pendiente alta en la misma dirección que

el movimiento glaciar, está constituido por una superficie irregular y fragmentada, a veces escarpada (Gutierrez, 2009). Esta disposición indica el sentido de movimiento del hielo de pendiente baja a alta, que es concordante con la topografía del terreno (Figura 20). Se desarrollan en los glaciares Charquini Sur donde se tiene un lecho de roca sedimentaria de grano medio a fino (Formación Cancañiri), ideal para la formación de estas geoformas y Charquini Norte donde afloran granitos (Véase Anexo 2).



Figura 19: Fotografía de rocas aborregadas en el valle del Glaciar Charquini Norte, la flecha indica la dirección de movimiento que habría seguido el glaciar.

En estas geoformas se encontraron fracturas que en media luna (Figura 20) donde las puntas se orientan hacia el flujo del movimiento glaciar y muescas crecientes donde las puntas de la media luna se dirigen en sentido contrario al flujo del hielo con un tamaño no mayor a los 5 cm, estas fracturas se forman por la intersección de dos grietas, una de bajo ángulo y otra subvertical, que es fácilmente arrancada por la masa de hielo para ser incorporada dentro de sí.



Figura 20: Fotografía de grietas en rocas aborregadas que evidencian la dirección de flujo del glaciar.

3.2.1.1.1.3. Valle glaciar.

Es una depresión de la superficie con un perfil transversal en forma de U rodeada lateralmente por pendientes rocosas abruptas (Figura 21) recubiertas en la parte baja por detritos, la parte central el relieve es llano debido a una nivelación posterior producida por depósitos de aluviones (Gutierrez, 2009). El tipo de valle glaciar presente en el área de estudio es de tipo alpino, cuya alimentación se efectúa en las zonas altas por un circo o conjunto de circos glaciares bien identificado en el glaciar de Charquini Sur.

El valle glaciar desarrolla pequeños cauces de primer orden cuyas aguas superficiales provenientes de la fusión del hielo, favorecen el desarrollo de pastizales hidrófilos conocidos como "bofedales" (véase Anexo 2). Esta planicie posee una pendiente que esta entre 10 y 15%.



Figura 21: Fotografía del valle Glaciar en "U" visto desde el Glaciar Charquini Sur.

3.2.1.1.2. Geoformas debidas a procesos de acumulación glaciar.

Estas geoformas se producen debido a que el material sedimentario existente en la masa de hielo es transportado y depositado en el lecho y/o el margen del glaciar, o también ser incorporado al agua de fusión para ser retransportado.

Las geoformas desarrolladas por este proceso encontradas en el área de estudio son:

- Manto de Till.
- Morrenas.

3.2.1.1.2.1. Manto de Till.

Está constituido por material pobremente clasificado constituido por una amplia gama de tamaños que van desde fino hasta bloques que se deposita en la base del glaciar (Figura 22). Su formación se debe a la incorporación gradual de detritos (en la parte alta del glaciar) a la capa de hielo por una continua acreción para luego ser liberados y acumulados dando origen al manto de till, esta geoforma es típica de glaciares templados o tropicales, tal es el caso del glaciar de Charquini Sur.

En general todo el till saturado en agua de fusión puede quedarse in-situ en sectores con poca pendiente y movilizarse en sectores alta pendiente por movimiento rotacional que es influenciado principalmente por la gravedad tal es el caso en el till del glaciar Charquini Sur.



Figura 22: Fotografía del depósito de Till en el glaciar Charquini Sur.

Según Gutierrez (2009) un till al estar constituido de material sin estratificación y saturado en agua de fusión, desarrolla un permafrost¹⁷ discontinuo debido a las bajas temperaturas de esta zona. En el día cuando la temperatura se eleva el permafrost desarrollado en el glaciar Charquini Sur sufre deshielo en su parte superior, este proceso se repite continuamente debido a continuos ciclos de hielo y deshielo, formando una capa denominada capa activa o mollisuelo con un espesor variable que va desde centímetros hasta profundidades que teóricamente no superan los 3 - 4 m de profundidad, donde este rango no está contemplado para un tipo de glaciar en específico. Al formarse esta capa activa y al estar saturada en agua disminuye la fricción y la cohesión en el suelo logrando el movimiento de los detritos bajo influencia

¹⁷ Es la capa del subsuelo que permanece siempre congelada.

de la gravedad favorable para la formación de suelos estriados (véase 3.2.1.2.2.3.4.) sobre la capa activa.

3.2.1.1.2.2. Morrena.

Formada por la acumulación de material detrítico en los bordes del glaciar, están compuestas por clastos que van desde bloques hasta material fino que pueden ser de carácter continuo o discontinuo según el tipo de movimiento glaciar ya sea de avance o retroceso.

3.2.1.1.2.2.1. Morrenas Laterales.

Este tipo de morrenas se disponen en los márgenes laterales del glaciar (Figura 23), alimentadas por material clástico proveniente de los escarpes circundantes, tienen una forma alargada con dirección paralela a la dirección del glaciar y al eje del valle. Una característica importante señalada por Cartagena (1998) es que una parte de los clastos encontrados en estas morrenas han sido posteriormente incorporados a la formación de las mismas debido a la constante acción erosiva seguida por un movimiento rotacional de los clastos a través de la pendiente. Esta característica fue evidenciada sobre las morrenas laterales del glaciar Charquini sur donde se observó fragmentos de roca proveniente de afloramientos rocosos adyacentes con elevada pendiente producto de la meteorización.

Las morrenas laterales son matrix soportadas, constituidas por detritos angulosos que van desde cantos hasta grano fino con una matrix limosa sin estratificación ni consolidación.



Figura 23: Morrenas laterales del margen Este del Glaciar Charquini Sur.

3.2.1.1.2.2.2. Morrenas Frontales.

Este tipo de morrenas se disponen de manera de arcos, paralelas a la parte frontal del glaciar, con una topografía ondulada, constituido por material detrítico que arrastra el glaciar, forman relieves no mayores a los 10 metros de altura (Figura 24), se disponen cortadas debido a la acción fluvial la cual va arrastrando el material aguas abajo.



Figura 24: Fotografía de perfil de una morrena terminal en el Glaciar Charquini Sur.

Están presentes sobre los valles glaciares del cerro Charquini, mostrando de esta manera diferentes etapas de avance y retroceso, donde las morrenas de avance o frontales son mayor tamaño no mayores a los 3 m de altura, compuesta por material detrítico que van desde bloques hasta grano fino con una marcada continuidad, mientras que las morrenas de retroceso poseen granulometría que va desde cantos hasta grano fino, pocas veces continuas debido a la acción erosiva fluvial (Figura 25).



Figura 25: Fotografía de las 10 morrenas del Glaciar Charquini Sur donde las más grandes vienen a ser las morrenas de avance y las de menor tamaño de retroceso (Rabatel, 2005).

3.2.1.1.2.3. Morrena Central.

Esta geofoma ocurre cuando dos lenguas de hielo provenientes de diferentes glaciares que bajan por la pendiente yuxtaponen sus morrenas laterales uniéndolas en una sola.

Este tipo de morrena se desarrolla al margen Este del área de estudio donde la lengua del glaciar Charquini Noreste, se une con un segmento de la lengua del glaciar Charquini Sudeste formando de esta manera una morrena central compuesta por el mismo material clástico que están compuestas las morrenas laterales y frontales de material detrítico que va desde bloques hasta grano fino (véase Anexo 2).

3.2.1.2. Procesos Periglaciares.

Los ambientes periglaciares se caracterizan por un predominio de ciclos de hielo y deshielo del terreno llamado proceso de gelifracción y por la existencia de un permafrost o terreno permanentemente helado.

El proceso de gelifracción se desarrolla en zonas de alta montaña y desempeña un papel importante todo el tiempo pero de manera discontinua ya que el hielo puede formarse en cualquier estación del año pero dura poco tiempo. De acuerdo a Derrau (1978) los ciclos de hielo - deshielo son diarios a 5000 m de altitud en los andes ecuatoriales puesto que en el día la temperatura puede llegar a superar los 0° y la noche la temperatura desciende por debajo de los 0° debido a que la cordillera se encuentra en una región de trópico externo (véase 2.4).

Este proceso se desarrolla plenamente en el área de estudio durante todo el año debido a que el cerro Charquini se encuentra por encima de los 5000 metros de altura sobre el nivel del mar produciendo meteorización y erosión, generando depósitos importantes de detritos en las faldas de los cerros en forma de canchales, conos de derrubios.

3.2.1.2.1. Geoformas debidas a procesos de erosión periglacial.

3.2.1.2.1.1. Aristas dentadas.

Son geoformas que se desarrollan influenciadas por la litología, donde rocas resistentes a la erosión como el granito o la arenisca forman crestas aserradas por acción de gelifracción la cual ataca ambos flancos de la roca generando esta disposición de pináculos o agujas (Figura 26). Este proceso también se presenta sobre otras rocas de tipo sedimentario, formando aristas pero menos agudas.

Esta geoforma puede también desarrollarse por el efecto glacial, donde la unión de las partes superiores de dos circos ubicados en lados opuestos de la montaña se intersectan formando crestas muy afiladas.



Figura 26: Fotografía de aristas dentadas que marcan el límite del glaciar Charquini oeste, Visto desde el nevado Huayna Potosí.

Estas aristas dentadas se desarrollan en areniscas cuarcíticas de la formación Amutara y granitos de la Formación intrusivo Huayna Potosí, siendo esta última la que posee los picos más elevados (6088 m.s.n.m.) y aserrados debido a su composición mineralógica.

3.2.1.2.2. Geoformas debidas a procesos de acumulación periglacial.

3.2.1.2.2.1. Cono de derrubios.

Esta geoforma es típica de un ambiente periglacial, se presenta a los pies de escarpes en el área de estudio, se forman cuando fragmentos rocosos resultantes de la meteorización se canalizan, dispersándose por su extremidad terminal a manera de cono (Figura 27), con pendientes entre 30° - 35°, donde en la parte alta se depositan

los fragmentos más pequeños y en la base los más grandes. Existen varios sectores donde los conos de derrubio se unen por todo el ancho de la pendiente formando un talud de derrubios continuo donde la acumulación de los fragmentos es continua y regular.

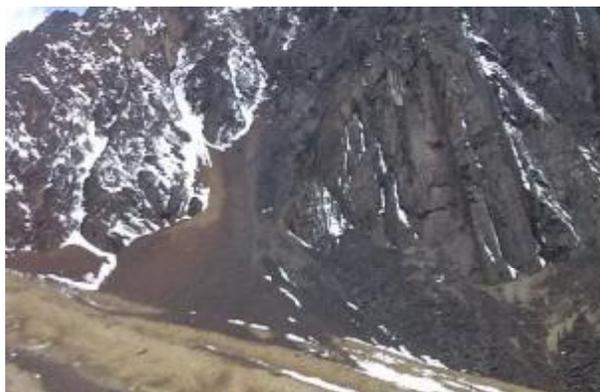


Figura 27: Fotografía de un cono de derrubio que se desarrolla a faldas de una pared rocosa al Este del glaciar Charquini Sur.

3.2.1.2.2.2. Canchales.

Son amplios mantos de derrubios que recubren principalmente las partes medias y bajas de las laderas (Figura 28), los clastos proceden de las áreas escarpadas superiores constituidas por roca resistente.



Figura 28: Fotografía de canchales formados en el margen Sur del Glaciar Charquini Oeste formando una superficie lisa de dos tonos.

Estas geoformas tienen una elevada pendiente en la parte alta que se va suavizando hacia la parte baja mostrando un perfil cóncavo, la potencia de estos depósitos puede alcanzar 30 m de espesor, su formación es producida por el desprendimiento sucesivo

de fragmentos de roca procedentes del escarpe superior, estos fragmentos se movilizan ladera abajo por rodadura y en ocasiones por pequeños deslizamientos.

En el área de estudio la pendiente de los canchales corresponde con el ángulo de reposo del material más grueso depositado y oscila entre los 25° y 40°.

Esta geoforma se desarrolla principalmente por la meteorización de rocas competentes particularmente en las areniscas de la Formación Amutara y el intrusivo Huayna Potosí en el área de estudio que forman relieves abruptos.

3.2.1.2.2.3. Suelos Ordenados.

Los suelos ordenados periglaciares se generan en la capa activa o mollisuelo por encima del permafrost, se clasifican por su forma geométrica en círculos, polígonos, redes, escalones y bandas son formadas por agrietamiento térmico del suelo helado.

La ocurrencia de estas geoformas sobre el área de estudio es limitada cubriendo superficies pequeñas, se desarrollan principalmente donde el material es suelto con tamaño de grano que va desde arcilla hasta arena gruesa en algunos casos y presencia de agua.

Siguiendo la clasificación de Gutierrez (2009) los suelos ordenados encontrados en el área de trabajo son:

- Suelos almohadillados.
- Suelos escalonados.
- Suelos poligonales.
- Suelos estriados.

3.2.1.2.2.3.1. Suelos almohadillados.

También llamado césped almohadillado, presenta formas intermedias entre polígonos y círculos, provista de vegetación con diámetros no mayores a 1 metro y alturas de 40 cm (Figura 29). Estos bofedales (familia de las ciperáceas) se desarrollan donde el suelo fue depositado por desplazamiento de masas y donde la disponibilidad de agua es casi constante durante todo el año.

Se disponen en áreas bajas de los glaciares donde la pendiente es moderada, también están presentes en zonas de depresión adyacentes a las rocas aborregadas a veces rodeándolas (Figura 19).



Figura 29: Fotografía de suelos almohadillos redondeados también llamados bofedales, con una importante presencia de agua, sobre el glaciar Charquini Norte.

3.2.1.2.2.3.2. Suelos escalonados.

Es otro tipo de suelo ordenado que se dispone en forma de escalones, se localizan en zonas muy restringidas con pendientes entre 5° y 20° de inclinación. Los detritos de los escalones carecen de clasificación, en algunos casos los escalones presentan un borde con vegetación que podría derivar de césped almohadillado. Su formación parece estar relacionado fundamentalmente con el movimiento diferencial de masas (Figura 30).



Figura 30: Fotografía de suelos escalonados formados hacia el glaciar Charquini Norte.

3.2.1.2.2.3.3. Suelos Poligonales.

Estos suelos se desarrollan por el proceso de solifluxión, donde el hielo se forma dentro de material fino plástico (arcillas) produciendo pequeños plegamientos, luego cuando el hielo se funde el material desciende en formando surcos que se conectan a manera de polígonos, estos surcos por lo general son rellenados por grava (Figura 31). Los suelos poligonales están presentes en áreas cercanas a pequeños lagos que son

abastecidos por agua de fusión y que al mismo tiempo mantienen el estado plástico del material circundante.



Figura 31: Fotografía de suelos poligonales formados en una superficie de baja pendiente y saturado en agua, los surcos son rellenados con cantos.

3.2.1.2.2.3.4. Suelos estriados.

Estos suelos se caracterizan porque están constituidos por un conjunto de franjas paralelas a la línea de máxima pendiente de la ladera. Las franjas presentan una alternancia entre material grueso y material fino produciendo franjas marcadas (Figura 32) se desarrollan sobre la capa activa que desarrolla el depósito de till en el glaciar Charquini Sur. Por lo general suelen ser rectas y alcanzan hasta los 120 m de longitud donde los ejes mayores de los clastos están en el plano vertical y paralelos a la banda.



Figura 32: Fotografía de suelos estriados que se forman sobre superficies con pendiente moderada con surcos rellenados por cantos.

3.2.1.3. Procesos Fluvio-glaciales.

Estos procesos tienen lugar cuando las aguas resultantes de la fusión de hielo glaciar, forman ríos que tienen un importante papel erosivo y deposicional de material detrítico

más allá de las masas de hielo, produciendo de esta manera una superposición del subsistema fluvio-glaciar.

3.2.1.3.1. Geoformas por procesos de erosión fluvio-glacial.

3.2.1.3.1.1. Terrazas.

Son pequeñas plataformas compuestas de material sedimentario que se desarrollan en los valles glaciares, estos depósitos que cuentan con desarrollo de suelo, son disectados por un río proveniente del glaciar cuyo origen se debe a la fusión del hielo provocando una mayor o menor fuerza erosiva (Figura 33).



Figura 33: Fotografía que muestra el desarrollo de terrazas sobre el valle glaciar, tomada desde el camino hacia el glaciar Charquini Sur.

3.2.1.3.2. Geoformas debidas a procesos de acumulación fluvio-glacial.

3.2.1.3.2.1. Canales fluvio-glaciales.

Según Gutiérrez (2009) los canales se forman por el flujo de corrientes de agua que se produce por la fusión de la nieve caída en época de lluvia la cual se derrite rápidamente en época seca dando lugar a importantes crecidas de flujo, estas escorrentías se concentran y fluyen en pocos días seguidas de un régimen menor pero constante que puede durar meses. El deshielo ocurre principalmente en la zona de ablación del glaciar produciendo la formación de canales que se desarrollan sobre el manto de till, las aguas de deshielo, son capaces de transportar una gran cantidad de sedimentos produciendo una importante labor erosiva con una velocidad estimada entre 8 - 15 m/seg.

En el glaciar Charquini Sur se identificaron tres canales que para este estudio fueron denominados A, B y C (Figura 34) que se disponen de la siguiente manera:

- Canal A.- Se encuentra en el flanco Oeste.
- Canal B.- Ubicado en el flanco Este, considerado el de mayor longitud con aproximadamente 600 m de longitud, alimenta el primer abanico fluvio-glaciar.
- Canal C.- Ubicado en el flanco Este, fluye por el margen del till con una longitud aproximada de 400 m y 25 m de ancho.

Estos canales son llamados proglaciares ya que el agua de fusión fluye fuera de la masa de hielo, producen importantes inundaciones llamadas Jökulhlaup en Islandia (Gutierrez, 2009), ocurren debido a elevadas cargas en pocas horas (en glaciares tropicales, la época húmeda coincide con el verano austral¹⁸, lo que ocasiona que estos glaciares reciban importantes volúmenes de nieve que son generalmente derretidos en los días sucesivos), seguidas de un descenso rápido, están constituidas principalmente por cantos, gravas sub-redondeados, estos detritos se forman a partir del retrabajamiento del till glaciar, el material fino es transportado aguas abajo.

¹⁸ Propio del hemisferio sur, se desarrolla entre los meses de Diciembre, Enero y Febrero.

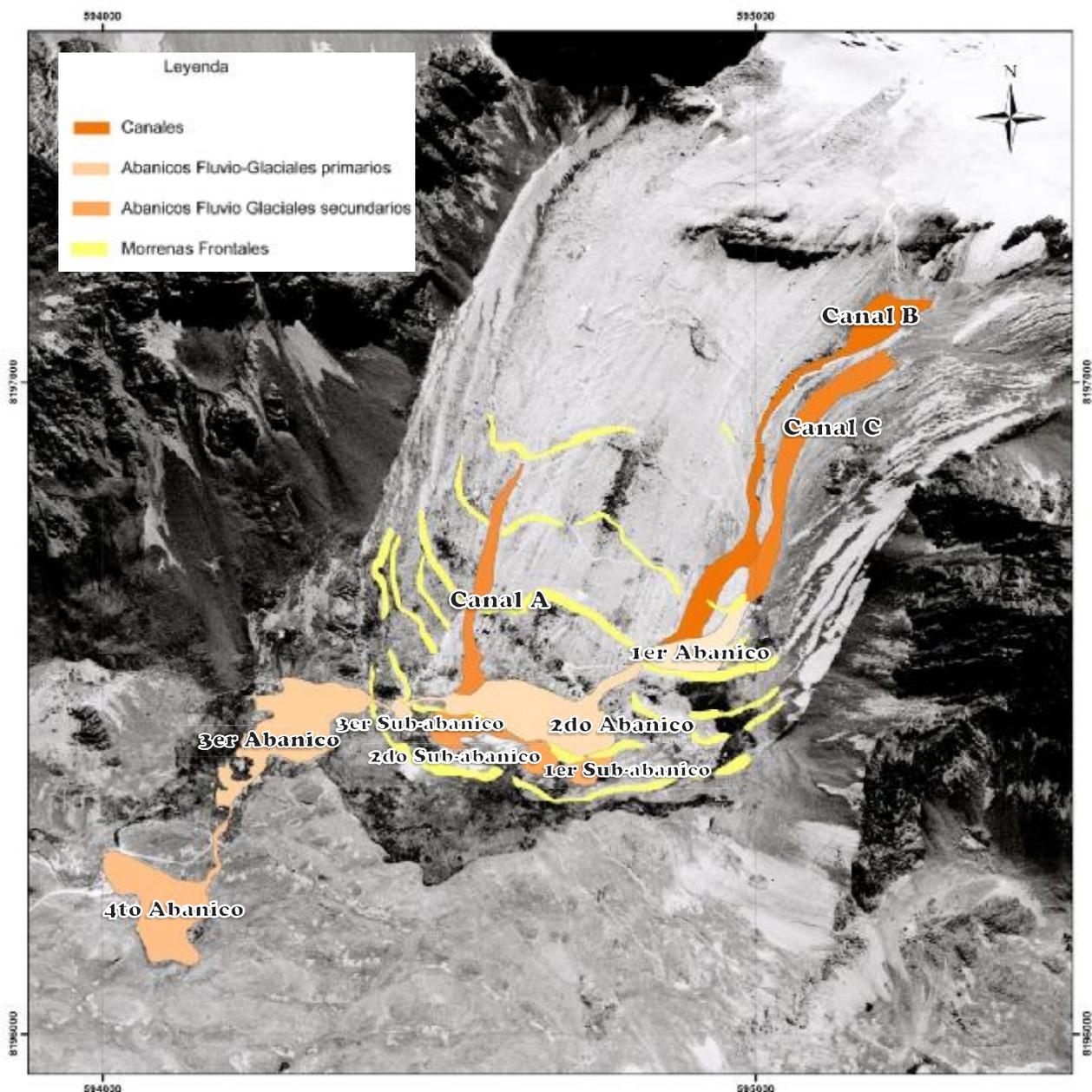


Figura 34: Fotografía aérea ortorectificada de la zona baja del glaciar Charquini Sur donde se aprecia abanicos y canales fluvio-glaciales (Fotografía 144 del vuelo hecho el año 2006).

La Figura 34 es un mapa geomorfológico, donde se identificaron los canales y abanicos fluvio-canales en el glaciar Charquini Sur, se determinó que el canal más importante corresponde al C ya que se constituye en el canal de incisión para el primer abanico fluvio-glacial, el canal B aporta material pero en menor cantidad a este abanico. El canal A deposita material detrítico al segundo abanico al mismo tiempo

aporta con corrientes de agua para que se tenga suficiente energía de arrastre y carga para la formación de posteriores abanicos.

3.2.1.3.2.2. Abanico Fluvio-glacial.

Los abanicos se forman normalmente como consecuencia de la fuerte reducción de la pendiente y disminución de la velocidad del flujo de agua, pero en el glaciar de Charquini Sur se encontró que estos se originan cuando el agua de fusión fluye ladera abajo arrastrando material detrítico procedente del manto de till hasta encontrar una morrena frontal donde se deposita el abanico fluvio-glacial. Para el presente trabajo estos abanicos fueron denominados como *abanicos principales* ya que fueron los primeros en formarse (Figura 34). El *primer abanico principal* (el más antiguo) se formó por acumulación detrás de la morrena frontal M6 (ver 2.6). Cuando el flujo de agua erosiona un segmento de la morrena, atraviesa volviendo a arrastrar el material por la pendiente hasta encontrar otro obstáculo en este caso otra morrena frontal M3 formando el *segundo abanico principal*, este abanico se encuentra con una baja pendiente topográfica por lo que el material se extiende lateralmente para luego ser retransportado por el agua hacia el borde oeste para formar un *tercer abanico principal* y finalmente un *cuarto abanico principal* (el más reciente) siguiendo la pendiente topográfica. Se determinó también la formación de tres pequeños abanicos que para este trabajo se denominaron *secundarios* ya que se formaron a partir del material depositado en el segundo abanico principal a consecuencia del desborde del agua en zonas débiles de la morrena M3.

La formación de este grupo de abanicos es llamada secuencial debido a que un abanico resulta de los depósitos de otro abanico preexistente (excepto el primero), esto ocurre en diferentes épocas en función a la disponibilidad de corrientes de agua que sean capaces de retransportar el material, por lo que es conocida como abanicos secuenciales.

3.2.2. Estratigrafía.

El área presenta formaciones correspondientes al: Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico identificadas en el mapa geológico (Fernandez et al., 1995) las formaciones están constituidas por diferentes tipos de material que se encuentran en contacto concordante y de falla en la secuencia.

Es así que se identificaron las siguientes unidades en base a información recopilada plasmadas en la Tabla 5.

Era	Sistema	Formación
Cenozoico	Cuaternario	Depósitos Cuaternarios
Mesozoico	Triásico	Intrusivo Huayna Potosí
Paleozoico	Silúrico	Fm. Uncía
		Fm. Cancañiri
	Ordovícico	Fm. Amutara

Tabla 5: Formaciones aflorantes en el área de estudio.

3.2.2.1. Formación Amutara.

La Formación Amutara aflora en los flancos Este y Oeste del glaciar Charquini sur y hacia el valle del glaciar Charquini Oeste, se encuentra en contacto tectónico con el intrusivo Huayna Potosí y contacto concordante con la Formación Cancañiri hacia el tope.

La secuencia sedimentaria es predominantemente arenosa, constituida por la alternancia de areniscas masivas de carácter cuarcítico con un alto grado de consolidación de color marrón claro y oscuro, en bancos de hasta 1 metro de potencia y lutitas bandeadas. Hacia el tope la secuencia se hace más fina con alternancia de limolitas gris verduscas y lutitas gris oscuras. Debido a la acción compresiva y deformacional causada por el intrusivo las rocas presentan fracturamiento.

Las rocas encontradas en la zona de contacto con el intrusivo Huayna Potosí se encuentran afectadas por metamorfismo de contacto mostrando tonalidades marrones y amarillezas denominadas hornfels.

3.2.2.2. Formación Cancañiri.

La Formación Cancañiri aflora en la región del cerro Sora Patilla y la región baja del glaciar Charquini Sur, en su base se encuentra en contacto concordante con la Formación Amutara y hacia el tope en contacto concordante con la Formación Uncía.

Esta unidad comprende diamictitas de color gris oscuro que están compuestas por fragmentos de arenisca masiva y granos de cuarzo subredondeados de tamaño variable dentro de una matriz de silicatos con mala selección.

Las rocas de esta formación se encuentran bien compactadas debido al metamorfismo existente en la zona, haciéndola adquirir una mayor resistencia y consistencia sin presentar indicios de estratificación. Algunos afloramientos sobresalen del relieve como rocas aborregadas atravesados por venillas delgadas de cuarzo de 1 a 2 cm de grosor.

3.2.2.3. Formación Uncía.

Esta unidad litológica ocupa mayor superficie en la región Sur del área de estudio, en su base está en contacto concordante con los depósitos de la formación Cancañiri.

Esta Formación es de carácter predominantemente pelítico, constituido principalmente por bancos de lutitas de color verde olivo a gris oscuro finamente estratificadas, intercaladas con delgados bancos de areniscas y limolitas que varían entre 0.50 a 1 metro de espesor con contenido de muscovita.

3.2.2.4. Formación Intrusivo Huayna Potosí.

El intrusivo Huayna Potosí es un cuerpo granítico que aflora en la región Norte del área de estudio, está compuesto principalmente de ortosa, plagioclasas, cuarzo, muscovita y biotita por lo que es llamada "bimicáceo". El granito intrusivo posee una textura netamente granítica de coloración clara con la presencia de xenolitos de textura microporfíricas granular que se presentan en formas redondeadas de color gris blanquecino, según McBride el intrusivo Huayna Potosí esta datada entre 225 y 202 Ma.

3.2.3. Geología Estructural.

Regionalmente existe una fuerte influencia de la tectónica hercínica la cual produjo un plegamiento intenso de las rocas precedentes a escala regional, posteriormente la intrusión de cuerpos ígneos habrían deformado estructuralmente las formaciones existentes.

El área de estudio presenta lineamientos que fueron reconocidas en las fotografías aéreas 144 y 145 del año 2006 (ver 5.2), con una dirección NW-SE que coinciden con:

- La dirección de la Cordillera Real.
- La dirección de las fajas aflorantes de las formaciones litológicas.
- Las estructuras que se desarrollan a nivel regional.

Las fotografías aéreas del área de estudio no evidencian la clara presencia de fallas ni plegamientos, estas estructuras se desarrollan principalmente en formaciones silúricas como ser en Uncía y Catavi hacia el Oeste del área de estudio según Fernandez et al. (1995), influenciadas por un tectonismo de carácter compresivo.

Los conspicuos encontrados en la formación Amutara con rumbo NO - SE presentan un elevado buzamiento en dirección al valle glaciar, más alejado en la formación Uncía se aprecia que el buzamiento es menor, reflejando de esta manera la deformación que habría producido el emplazamiento del intrusivo a paquetes sedimentarios del Paleozoico.

Entonces podría mencionarse que intrusivo Huayna Potosí habría aprovechado fallas que se habrían formado en el paquete sedimentario por donde este cuerpo ígneo habría emergiendo sin embargo dichas fallas no pudieron ser evidenciadas en el área de estudio.

3.2.3.1. Diaclasas.

Las diaclasas en el área de estudio se encuentran distribuidas en dos tipos distintos de roca: En rocas *plutónicas* el diaclasamiento es consecuencia del enfriamiento de la masa magmática y en rocas *sedimentarias* es producida por esfuerzos compresivos que produjeron el solevantamiento de la cordillera durante los episodios tectónicos y por procesos periglaciares que forman grietas que llegan a agrandarse produciendo erosión de bloques.

3.2.4. Cuerpos Ígneos.

El cerro Charquini está constituido por rocas graníticas del intrusivo Huayna Potosí, un cuerpo ígneo que no habría alcanzado la superficie, ocurrido como consecuencia de una intensa actividad ígnea en Bolivia durante el sistema Terciario (Sánchez, 1977). Estas rocas graníticas tienen una disposición lineal NO - SE bien definida que coincide con el eje de rifting intracontinental existente en el territorio boliviano para el Triásico - Jurásico (Sempere, 2002).

Evernden en el año 1961 determinó que esta unidad se encuentra entre el triásico y jurásico, luego de analizar varias muestras mediante el método K - Ar determinó una

edad de entre 180 y 190 Ma, por otra parte McBride (1983) que también por el método K –Ar la habría datado entre 225 - 202 Ma.

El stock granítico del cerro Charquini es asimétrico y se extiende de NE a SW siguiendo el rumbo general de todos los intrusivos de la Cordillera Real, este cuerpo se encuentra en contacto tectónico con una roca encajonante que corresponde a sedimentos ordovícicos de la Formación Amutara, a escala macroscópica el contacto no posee indicios de deformación, por lo que se asume que la intrusión habría aprovechado fallas tensionales para emerger y con un enfriamiento lento.

Gorinova et al. (2006) estudiaron el intrusivo Huayna Potosí determinando que está compuesto principalmente por granitos de tipo leucocrático y bimicáceos (muscovita y biotita) con una estructura de grano fino a grano medio, presenta xenolitos de rocas sedimentarias (Figura 35), de monzonitas y cuarzo monzonitas debido a un magma que fue formado en la condiciones del manto litosférico de carácter alcalino. Los estudios petrográficos determinaron que estos granitoides presentan una textura hipidiomorfogranular, posee una asociación paragenética de cuarzo, plagioclasas (albita-oligoclasa), ortosa, microclina, moscovita, biotita y la presencia de minerales accesorios de apatito, circón y turmalina.



Figura 35: Fotografía de un Xenolito presente en afloramientos de Granito perteneciente a la formación intrusivo Huayna Potosí.

Los estudios determinaron que los granitos son el producto de una serie magmática intermedia entre alcalina que es procedente del manto superior y subalcalina rica en potasio procedente de la corteza inferior, por lo tanto es considerado como un híbrido, producto de la mezcla de estos dos tipos de magmas desarrollados en condiciones de extensión de la corteza terrestre.

3.2.5. Metamorfismo.

En la zona de estudio el metamorfismo está presente afectando los sedimentos paleozoicos pertenecientes a la Formación Amutara del sistema Ordovícico, este proceso está relacionado al emplazamiento granítico del intrusivo Huayna Potosí que se desarrolló en la Cordillera Real.

El metamorfismo se caracteriza por la inserción de soluciones residuales del magma dentro la roca de caja produciendo la recristalización de sus granos, generando de esta manera un metamorfismo de bajo grado debido a la sola influencia de la temperatura como agente principal.

Las areniscas de la formación Amutara afectadas por este metamorfismo formaron una aureola de contacto, que se dispone rodeando a la masa granítica. El espesor de esta aureola no pudo ser identificada a simple vista ya que como se muestra en la Figura 36, la roca caja se encuentra muy alterada.



Figura 36: Fotografía del contacto metamórfico entre roca sedimentaria y roca ígnea en el margen Noroeste del intrusivo Charquini Sur.

3.2.6. Influencia del lecho rocoso en masas de hielo.

La resistencia que posee el lecho rocoso sobre el cual fluye el glaciar es un factor influyente en el desarrollo del glaciar ya que afecta directamente su dinámica de flujo en el tiempo y también como aportante de material que es transportado.

Geológicamente el área presenta afloramientos plutónicos hacia el Norte donde se desarrolla el glaciar Charquini Norte y afloramientos de tipo sedimentario hacia el Sur donde está el glaciar Charquini Sur, estos dos glaciares presentan diferencias marcadas debido al tipo material del lecho. Se realizó una comparación de las

características físicas entre estos dos tipos de materiales pero para ello tuvo que agruparse por grupos: el primero, rocas plutónicas asociado a la formación Intrusivo Huayna Potosí y el segundo rocas sedimentarias asociado a las formaciones depositadas en el Paleozoico.

3.2.6.1. Resistencia.

La resistencia a la compresión es el máximo esfuerzo que una roca puede soportar sometida a una compresión uniaxial¹⁹, esta resistencia que posee la roca llega a influir el desarrollo y el comportamiento del glaciar en el tiempo así también a la formación de geoformas.

A continuación se presentan los resultados obtenidos, según ensayos y publicaciones realizados en el laboratorio de mecánica de rocas de la ETS de Ingenieros de Minas de Madrid (Ramírez et al., 2004) donde se ven algunas propiedades físicas y mecánicas de las rocas que aparecen con más frecuencia en los macizos rocosos (Tabla 6).

TIPO DE ROCA	RESISTENCIA (Kg/cm ²)	DENSIDAD (Tm/m ³)
Andesita	1.500-2.500	2,5 a 2,8
Arcillita	280-800	2,2 a 2,7
Arenisca	80-2.000	1,6 a 2,9
Basalto	2.000-4.000	2,7 a 2,8
Caliza	800-1.500	1,5 a 2,8
Conglomerado	1.400	2,0 a 2,7
Cuarcita	900-4.700	2,3 a 2,7
Dacita	1200-5000	2,5 a 2,75
Diabasa	1.600-2.400	2,8 a 3,1
Dolomía	360-5.600	2,2 a 2,9
Esquisto	108-2.300	2,7 a 2,9
Gabro	1500-2800	2,8 a 3,1
Gneis	1.500-3.000	2,5 a 2,8
Granito alterado	108-1.450	2,5 a 2,6
Granito sano	800-2.700	2,5 a 2,8
Grauvaca	2.000-2.500	2,6 a 2,7
Marga	35-1.970	2,6 a 2,7
Mármol	800-1.500	2,6 a 2,8
Pizarra	2.000-2.500	2,7 a 2,8
Riolita	800-1600	2,45 a 2,6
Yeso	40-430	2,2 a 2,3

Tabla 6: Características físico-mecánicas de varios tipos de rocas (Ramírez et al., 2004).

¹⁹ El ensayo de compresión uniaxial se trata de un ensayo donde la roca se rodea de la presión atmosférica.

Así mismo se muestra en la Tabla 7 una evaluación que se realiza In-situ que relaciona la resistencia de compresión de una roca con la huella y sonido que esta produce al ser golpeada con un cateador. La tabla parte desde la disgregación de la roca cuando es muy blanda hasta la rotura dificultosa correspondiente a una roca muy dura.

DESCRIPCIÓN	RESISTENCIA (Kg/cm ²)	HUELLA Y SONIDO
Muy blanda	10-15	El material se disgrega completamente con un golpe del pico del cateador y se deshace con navaja.
Blanda	50-250	El material se indenta de 1.5 a 3 mm con el pico del cateador y se deshace con la navaja.
Media	250-500	El material NO se deshace con la navaja. La muestra sostenida en la mano se rompe con UN (1) golpe de cateador.
Moderadamente dura	500-1000	La muestra se rompe con VARIOS golpes de cateador.
Dura	1000-2500	La muestra depositada en el suelo se rompe con UN (1) golpe del cateador.
Muy dura	>2500	La muestra se rompe con dificultad a golpes con el pico del cateador. Sonido MACIZO.

Tabla 7: Evaluación In Situ de resistencia del material rocoso (Ramírez et al., 2004).

- **Rocas plutónicas.**

Según (Ramírez et al., 2004) el granito es una roca ígnea plutónica que aflora en el sector del glaciar Charquini Norte, posee una resistencia de compresión elevada que va desde los 800 hasta los 2700 (Kg/cm²) al mismo tiempo posee una elevada dureza en función a su contenido mineral la cual en campo presenta dificultada para ser rota por lo que esta roca es clasificada como muy dura según la Tabla 7.

Este tipo de roca al poseer una alta dureza es más resistente a procesos erosivos glaciares ya que es más difícil que el glaciar pueda incorporar o arrancar material detrítico dentro de sí, evitando de esta manera el rápido socavamiento y la formación de una superficie cóncava. Un aspecto observado en el glaciar Charquini Norte fue que la masa de hielo aprovecha el diaclasamiento que el granito puede llegar a desarrollar, donde aprovechando los planos o grietas este arranca bloques que son arrastrados hacia el valle entonces como se observa en la Figura 37 la superficie rocosa va adquiriendo una geometría escalonada irregular.



Figura 37: Lecho rocoso granítico del glaciar Charquini Norte.

- **Rocas sedimentarias.**

Se decidió agrupar las rocas aflorantes en el glaciar Charquini Sur pertenecientes a las formaciones: Amutara, Cancañiri y Uncía en donde los principales materiales son la arenisca y pizarra. En donde las areniscas según la Tabla 6 cuentan con una resistencia a la compresión que va desde los 50 hasta los 2000 Mpa siendo que existe la presencia de niveles cuarcíticos se consideró el rango más alto por lo que es considerada una roca dura según la Tabla 7 al igual que la pizarra ya que in situ pueden llegar a romperse de un golpe. En general se concluyó que el paquete de rocas sedimentarias en el área corresponde a la clasificación de duro.

En la Figura 38 podemos observar que la morfología del glaciar Charquini Sur es diferente al glaciar Charquini Norte ya que se puede advertir que se formaron fuertes pendiente hacia el tope que va suavizándose hacia la base debido al tipo de roca, así mismo se observa la formación de rocas aborregadas en la parte media atribuible a rocas duras de la formación Cancañiri. En conclusión podemos decir que la superficie es más suave y regular debido a la influencia de la resistencia lecho rocoso a la erosión.

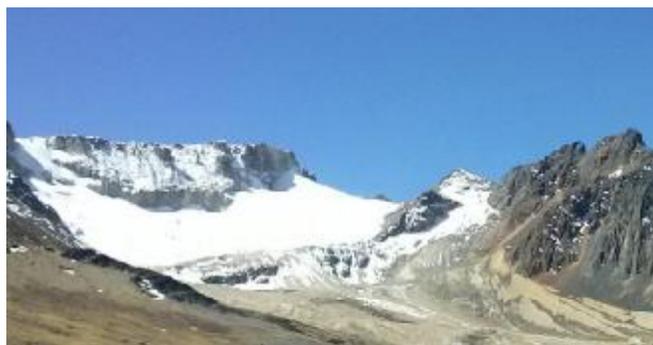


Figura 38: Paisaje del Glaciar Charquini Sur visto desde su valle.

3.2.6.2. Color.

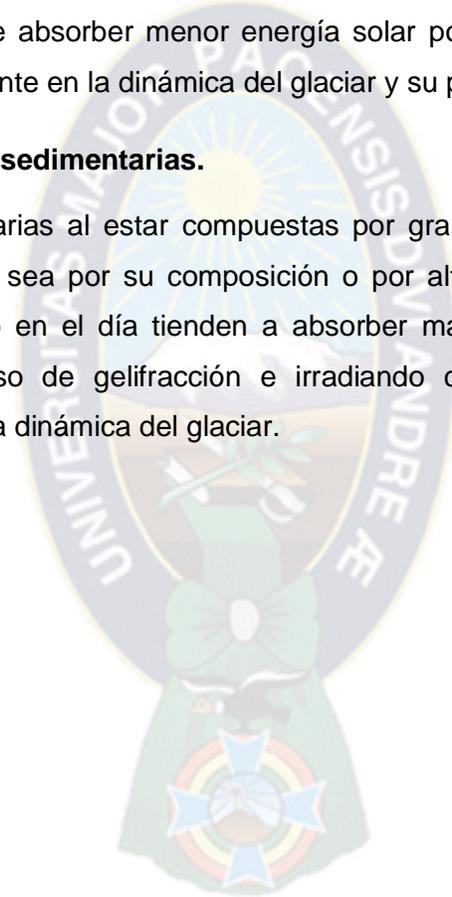
El color es una propiedad física que influye directamente con la absorción de la radiación solar de las rocas, donde los colores oscuros absorben más energía que los colores claros.

- **En rocas plutónicas.**

Las rocas de este tipo en el área de estudio están constituidas por granito de color claro debido a que está formado principalmente por cuarzo (color blanquecino), es así que esta roca tiende a absorber menor energía solar por lo tanto no se calienta, esto repercute positivamente en la dinámica del glaciar y su preservación.

- **En rocas sedimentarias.**

Las rocas sedimentarias al estar compuestas por granos de diferentes rocas tienen colores variables ya sea por su composición o por alteración, pero en conjunto son oscuras por lo tanto en el día tienden a absorber mayor energía y calentarse más aportando al proceso de gelifracción e irradiando calor, lo cual actúa como un catalizador durante la dinámica del glaciar.



CAPITULO IV: CÁLCULO DEL BALANCE DE MASA MEDIANTE EL MÉTODO GLACIOLÓGICO

El Balance de Masa de un glaciar se traduce en la cantidad de masa (nieve/hielo) que un glaciar acumula o pierde durante un lapso de tiempo determinado (generalmente un año hidrológico). Las unidades que se utilizan para expresar el balance de masa de un glaciar, son los metros de agua equivalente (m.eq.agua) y también en milímetros. El método glaciológico corresponde a la estimación del balance de masa que se realiza utilizando balizas en la zona de ablación y pozos o perforaciones de nieve/hielo en la zona de acumulación. Los valores de los muestreos son transformados a su equivalente en agua e integrados a toda la superficie del glaciar, la diferencia entre los valores integrados en la zona de ablación y en la zona de acumulación indican cuantitativamente si un glaciar ha perdido o ha ganado masa durante el periodo de tiempo estudiado.

Sobre el glaciar de Charquini Sur, se han utilizado en promedio alrededor de 10 a 15 balizas en la zona de ablación, y dependiendo del año hidrológico (si es húmedo) entre 2 a 4 pozos/perforaciones de nieve/hielo (Figura 39). Lastimosamente, sobre el glaciar de Charquini Sur, no es posible realizar un muestreo más denso, debido fundamentalmente al peligro de grietas y caída de bloques cerca de las paredes del glaciar. Debido a estos inconvenientes, hasta ahora nunca se ha podido establecer claramente cuál es la precisión del método glaciológico o directo sobre el glaciar de Charquini Sur. Como ya lo mencionamos, el método más preciso para estimar el balance de masa de un glaciar, corresponde al método volumétrico, que será abordado en el capítulo 6.

Las mediciones llevadas a cabo por el proyecto *GREAT ICE (Glaciers et Ressources en Eau d'Altitud, Indicateurs Climatiques et Environnementaux)* del IRD, son utilizadas para calcular el balance de masa anual. La Tabla 8 muestra los resultados que corresponden los años hidrológicos que va desde el 2006 hasta el 2012 en mm.eq.agua.

Año Hidrológico	Bn (mm.eq.agua)
2006-2007	161
2007-2008	-1577
2008-2009	-957
2009-2010	-2921
2010-2011	-1205
2011-2012	-127

Tabla 8: Balance de masa (Bn) del glaciar Charquini Sur expresado en milímetros equivalente agua (mm.eq.agua) desde septiembre del el 2006 hasta agosto del 2012.

En estos valores se observa una clara tendencia negativa con una pérdida promedio de -1104 mm por año, siendo el año con mayor ablación el año 2009 - 2010.

Para poder realizar una comparación entre este método con el método volumétrico, uno de los objetivos del presente trabajo de investigación, se tuvo que realizar el correspondiente cálculo del balance de masa del glaciar de Charquini Sur mediante el método glaciológico para el año hidrológico 2012 - 2013 para obtener luego la acumulada 2006 - 2013.

A continuación se presentara el método utilizado para obtener el balance de masa del Glaciar de Charquini Sur.

4.1. Determinación de los parámetros morfométricos de la Cuenca Glaciar.

4.1.1. Red de balizas.

Se realizó mediciones de localización (el 24 de Septiembre del año 2013) sobre la zona de ablación a la red de balizas con un GPS diferencial (0,020 m de precisión) y sobre la zona de acumulación a pits con un GPS de navegación (5 - 3 m de precisión).

En la zona de ablación se utilizaron 10 balizas (Tabla 9) que fueron instaladas por el mes de Julio del 2012.

No Baliza	X	Y	Z
18J	595081,164	8197412,923	5033,042
17J	595096,222	8197445,239	5045,125
15J	595332,070	8197383,772	5105,361
19D	595181,662	8197617,861	5140,997
3H	595602,395	8197312,215	5176,426
6D	595594,367	8197384,441	5186,820
2H	595677,066	8197336,488	5198,438
2J	595660,855	8197375,645	5201,418
7K	595637,912	8197451,653	5212,652
5F	595683,334	8197417,248	5216,903

Tabla 9: Coordenadas (UTM WGS84) de las balizas para el año 2013 con una precisión de 0.02 m.

En la zona de acumulación del glaciar se realizaron 3 pits en la zona de acumulación (Tabla 10) en fecha 12 de Septiembre del 2013, con las siguientes coordenadas:

No Pit	X	Y	Z
1	595816	8197574	5313
2	595692	8197577	5275
3	595701	8197496	5252

Tabla 10: Coordenadas (UTM WGS84) de las balizas para el 2013 con una precisión de 3 m

4.1.2. Contorno Glaciar.

El contorno de un glaciar va cambiando año tras año y es muy importante poder determinar de manera precisa este contorno para poder generar rangos altitudinales e integrar las mediciones.

La determinación del contorno glaciar para el año 2013 fue realizada fusionando el contorno de la parte superior (zona de acumulación) del año 2006 obtenido mediante restituciones fotogramétricas 2006 (debido al difícil acceso, peligrosidad y asumiendo que el contorno en esta zona glaciar cambia muy poco) con el contorno inferior (zona de ablación) obtenido a partir de mediciones realizadas con el GPS diferencial, utilizando el método de Stop And Go con un lapso de medición de 2 minutos por punto, (Figura 39).

4.1.3. Curvas Hipsométricas²⁰.

Para realizar el balance de masa fue necesario caracterizar el glaciar en rangos o segmentos altitudinales mediante el uso de curvas de nivel que fueron generadas del modelo digital de elevación del terreno (obtenida por restitución fotogramétrica de las fotografías del año 2013) y utilizando como límite el contorno glaciar, para dichos rangos se decidió utilizar un intervalo de 50 metros, obteniendo ocho diferentes zonas altimétricas desde el borde inferior del glaciar a una altitud de 5000 m.s.n.m hasta el borde superior del glaciar a 5350 m.s.n.m (Tabla 11).

Rango	Altitud
1°	5000-5050
2°	5050-5100
3°	5100-5150
4°	5150-5200
5°	5200-5250
6°	5250-5300
7°	5300-5350
8°	5350-5400

Tabla 11: Cuadro de zonas altitudinales del glaciar Charquini Sur.

Este aspecto es muy importante, ya que a medida que un glaciar se encuentre en un periodo de avance o de retroceso (tal es el caso para los glaciares tropicales) su morfología cambia año tras año, donde la única forma de obtener la morfología real de un glaciar es generando constantemente modelos digitales de elevación (Dem) a partir de fotografías aéreas, lastimosamente la toma de dichas fotografías aéreas es muy costosa y difícil de realizar año tras año por lo tanto la generación anual de Dem's no es factible. Los balances de masa obtenidos entre los años hidrológicos 2006 - 2007 y 2011 - 2012 sobre el Glaciar de Charquini Sur tomaron en cuenta, y de manera constante, la morfología del glaciar para el año 2006, lastimosamente esto ocasiona un error aleatorio en el cálculo del balance de masa, ya que la superficie de interpolación varía año tras año.

Gracias al método propuesto en la presente trabajo, se podrá obtener el balance de masa año tras año con la morfología actualizada del glaciar. Este tema lo será tratado ampliamente en el capítulo 6.

²⁰ Es un diagrama de curvas utilizado para indicar la proporción de superficie con relación a la altitud.

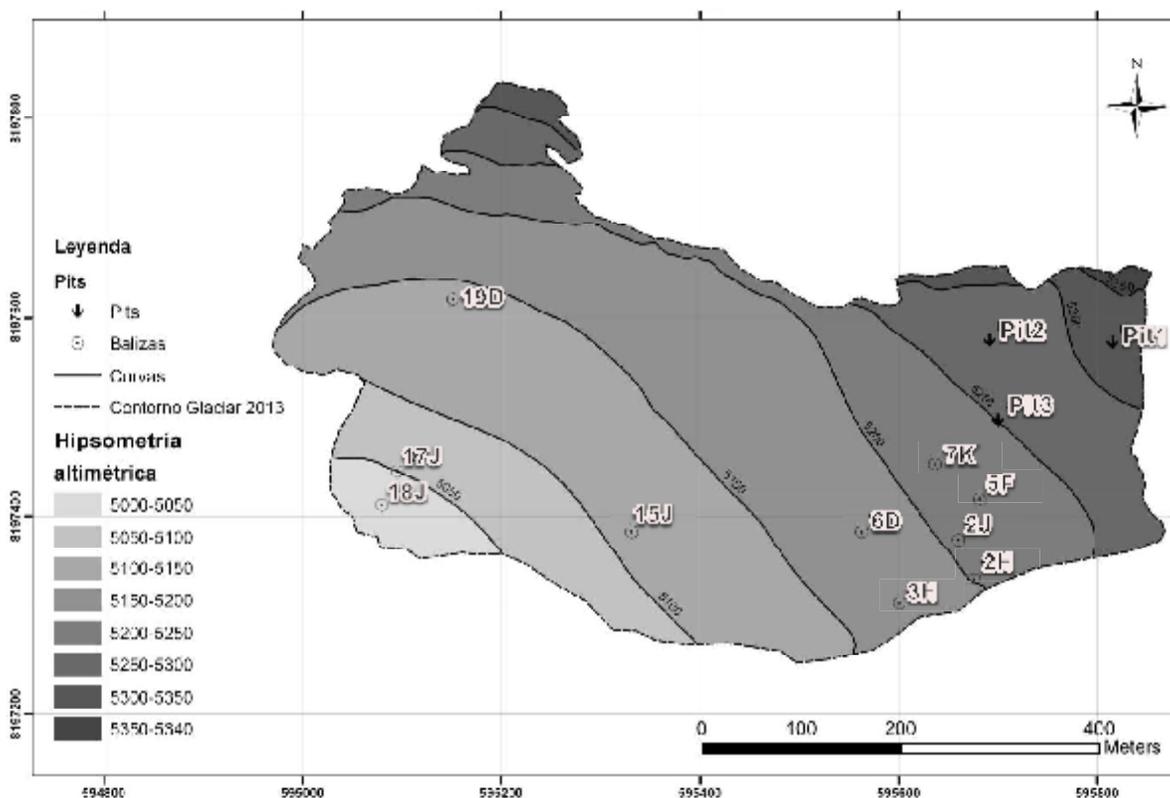


Figura 39: Mapa Hipsométrico del Glaciar Charquini Sur para el 2013.

4.2. Balance de masa Glaciológico.

4.2.1. Zona de acumulación.

Para determinar el balance de masa de la zona de acumulación se procedió a excavar pits hasta encontrar un nivel de nieve compactado (densidad de 0.5 a 0.6 g/cm^3) ya que a partir de este nivel continuar excavando manualmente es difícil se procedió a perforar con un equipo especializado denominado *PICO* (*Polar Ice Coring Office*) hasta encontrar un horizonte de hielo oscuro o sucio que marca la superficie glaciár descubierta del año anterior (durante la época seca no se producen precipitaciones importantes por lo que la superficie del glaciar queda expuesta a la radiación solar transformando la nieve superficial en neviza o incluso en una capa de hielo superficial donde se va depositando polvo, partículas correspondientes a la quema, etcétera ensuciando de esta manera la superficie glaciár). En nuestro caso para el año 2012, se observó que está caracterizada por un nivel de hielo sucio (a aproximadamente 2 m de profundidad con de 5 cm de espesor) que fue reconocido en el núcleo o core de hielo extraído con el instrumento *PICO*.

En total, se realizaron 3 pozos o pits (Figura 40.a) en la zona de acumulación (ver Figura 1) del glaciar (Tabla 10), en cada pit de muestreo se calculó la densidad de nieve para cada estrato (Figura 40.b) con la ayuda de un cilindro de metal y una balanza (Figura 40.d). Posteriormente y luego de encontrar el nivel de nieve compactado, se procedió a perforar las capas infrayacentes, hasta encontrar el nivel de hielo sucio del año anterior. De esta forma, se obtuvieron varios segmentos de nieve/neviza o hielo conocidos como cores (Figura 40.c), los cuales fueron medidos y pesados para obtener la densidad. Toda la información correspondiente a los cálculos figura en las tablas 33, 34, 35 del Anexo 1 donde se hizo el cálculo del balance de masa correspondiente a un determinado rango altitudinal.



Figura 40: Esquema de la medición en la zona de acumulación, equipo PICO en el pit (a), pared de nieve descubierta (b), segmentos core (c), cilindro de metal y balanza electrónica para calcular el volumen de muestras (d).

La densidad de la nieve calculada en cada uno de los tres pits fue ploteada en una gráfica en función a la profundidad desde la superficie (Figura 41), donde el pit 2 fue el más profundo con 3.30 m.

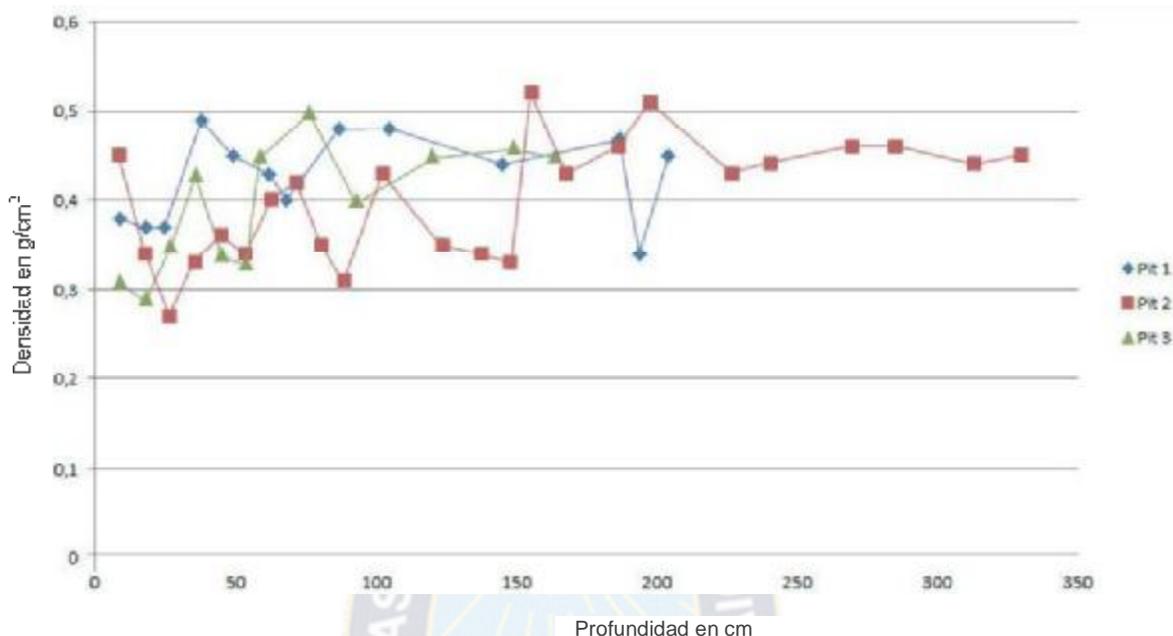


Figura 41: Gráfica de los 3 pits donde se ve la densidad vs profundidad.

En la Figura 41 se observa que el Pit 1 posee una baja densidad a una profundidad cercana a cero pero a medida que se va profundizando se advierte que la densidad de las capas de nieve va aumentando y haciéndose constante hasta aproximadamente los 2 m de profundidad donde se observa una caída en el grafica posiblemente a una anomalía durante la toma de datos. El Pit 2 (representado de color rojo en la gráfica) presenta una tendencia más sinuosa de la densidad a poca profundidad la cual se hace constante a partir de los 2.3 m de profundidad. El Pit 3 que se encuentra a menor altura que los dos Pits anteriores refleja un claro aumento de la densidad de la nieve con valores sinuosos cerca a la superficie pero más claros a mayor profundidad.

Las líneas que representan la densidad de las capas de nieve obtenidas de los Pits tienen una tendencia sinuosa a baja profundidad que pasa a semi-continua hacia el fondo. Esta disposición se debe a que las capas de nieve cercanas a la superficie presentan una densidad variable debido a la temperatura ambiente en la que la nieve precipita donde a temperaturas bajas los granos son más grandes con mayores espacios intrínsecos reduciendo de esta manera la densidad de esos granos mientras que a temperaturas cercanas a 0° (ambiente más cálido) los granos son más pequeños con pequeños espacios intrínsecos aumentando su densidad, entonces se dice que la

densidad de los granos de nieve que precipitan es inversamente proporcional a la temperatura ambiente en el que precipitan. Otro factor que influye a que la densidad sea variable entre capas de nieve es el periodo que transcurre entre nevadas, esto hace que la nieve previamente precipitada este expuesta a la radiación solar, fundiéndola y reduciendo los espacios intrínsecos aumentando de esta manera su densidad, por lo tanto mientras mayor sea el tiempo entre nevadas mayor será el tiempo de influencia de la radiación solar sobre la capa de nieve de superficie. El comportamiento de la densidad a profundidad se debe a la presión del manto de nieve más joven que ejerce sobre las capas de nieve más antiguas produciendo la compactación de la nieve haciéndola más densa y homogénea en sus capas.

Así es que se tienen capas de nieve con diferentes densidades cerca a la superficie y a mayor profundidad las capas tienen mayor densidad influenciadas por la presión ejercida de las capas de nieve que más recientes.

4.2.2. Zona de ablación.

Para determinar el Balance de masa (Bn) en la zona de ablación se procedió a calcular el Bn de una baliza (bi), para lo cual se utilizó la siguiente ecuación (Francou et al., 2004).

$$b_i = \rho_o (Z_{i-1} - Z_i) + \rho (Y_i - Y_{i-1})$$



Figura 42: Esquema de una baliza instalada sobre el glaciar durante el tiempo t_{i-1} y t_i .

Dónde:

b_i = balance en un punto

ρ_o = densidad de hielo (0.9 g/cm³)

ρ = densidad de la nieve (0.4 g/cm³)

Z= Emergencia²¹

Y= Nieve

t_i = tiempo actual

t_{i-1} = tiempo anterior

Las mediciones realizadas para el año hidrológico 2012-2013 fueron realizadas a balizas entre los meses de Septiembre del 2012 y Agosto del 2013. Las balizas fueron agrupadas por rangos altitudinales (según su altura en Z) para luego aplicar la ecuación ya mencionada obteniendo de esta manera el balance de masa en un punto determinado (Bn) del glaciar.

Balizas	20/09/2012		24/09/2013		Balance de masa (2012 - 2013)			
	Y _{i-1}	Z _{i-1}	Y _i	Z _i	Rangos (m)	Bn (cm)	Bn (mm)	Prom mm.eq.a
18J	0	651,3	22	903	5000-5050	-237,530	-2375,3	-2057,85
17J	5	492,4	55	658		-174,040	-1740,4	
15J	16	465	0	537	5100-5150	-56,800	-568	-523,5
19D	24	616	55	652		-47,900	-479	
3H	12	674	0	742	5150-5200	-55,200	-552	-348
6D	16	826	27	852		-28,900	-289	
2H	15	673	43	680		-20,300	-203	
2J	12	248	30	247	5200-5250	-8,100	-81	-47
7K	32	53	39	40		8,200	82	
5F	36	612	50	620		-14,200	-142	

Tabla 12: Valores altitudinales de emergencia, nieve y balance de masa de las balizas.

Los valores del balance de masa de cada baliza fueron promediados para obtener el balance promedio correspondiente a su rango altitudinal. Como podemos observar en la Tabla 12, el glaciar perdió en promedio alrededor de -2057.85 mm.eq.agua entre 5000 y 5050, -523.5 mm.eq.agua entre 5100 y 5150, -348 mm.eq.agua entre 5150 y 5200 y -47 mm.eq.agua entre 5200 y 5250. En este sentido, podemos observar como el glaciar pierde mayor cantidad de nieve/hielo en las zonas a menor altitud. Además, podemos advertir que la línea de equilibrio altitudinal o ELA en inglés, se encuentra alrededor de los 5241 m.s.n.m para el año 2012 - 2013.

²¹ Longitud del segmento de la baliza que no se encuentra cubierta por nieve.

4.2.3. Cálculo del balance de masa anual 2006 - 2013 por rango altitudinal.

Obtenidos los balances de masa de la zona de acumulación y ablación según su rango altitudinal se procedió a determinar la integración de estos valores sobre toda el área del glaciar para ello, fue necesario calcular la superficie (s) de cada rango altitudinal en metros (m²) o kilómetros (Km²) cuadrados, estos resultados son expresados a continuación en la tabla 13.

dZ (m)	s (m ²)	s (km ²)	s/S
5350-5400	1121,02	0,0011	0,00
5300-5350	12478,72	0,0125	0,04
5250-5300	38366,54	0,0384	0,13
5200-5250	48198,07	0,0482	0,16
5150-5200	91978,51	0,0920	0,30
5100-5150	75738,36	0,0757	0,25
5050-5100	28334,25	0,0283	0,09
5000-5050	9858,95	0,0099	0,03
Total (s)	306074	0,306074	1,0000

Tabla 13: Superficie de cada segmento de rango altitudinal del glaciar Charquini Sur.

Luego de obtener las áreas se procedió al cálculo general (sumatoria de los valores de cada rango altitudinal) del balance de masa para todo el glaciar (Tabla 14).

Rangos altitudinales (m)	Altura promedio (m)	s (m ²) 2013	s (km ²) 2013	Bn (mm)	Bn (m)	Bn*s (mm.eq. agua)	Bn*s (m.eq. agua)	Bn*s/S (mm.eq. agua)	Bn*s/S (m.eq. agua)
5350-5400	5375	1121,020	0,001	870,470	0,870	0,976	0,001	3,188	0,003
5300-5350	5325	12478,720	0,012	870,470	0,870	10,862	0,011	35,489	0,035
5250-5300	5275	38366,540	0,038	1010,035	1,010	38,752	0,039	126,608	0,127
5200-5250	5225	48198,070	0,048	-47,000	-0,047	-2,265	-0,002	-7,401	-0,007
5150-5200	5175	91978,510	0,092	-348,000	-0,348	-32,009	-0,032	-104,578	-0,105
5100-5150	5125	75738,360	0,076	-523,500	-0,524	-39,649	-0,040	-129,540	-0,130
5050-5100	5075	28334,250	0,028	-2057,850	-2,058	-58,308	-0,058	-190,502	-0,191
5000-5050	5025	9858,950	0,010	-2057,850	-2,058	-20,288	-0,020	-66,285	-0,066
Balance de masa 2012-2013 (mm.eq.agua)			0,3061					-333,02	-0,3330

Tabla 14: cálculo del balance de masa del Glaciar Charquini Sur.

Realizados los cálculos se obtuvo un resultado final de -333.02 mm.eq.agua, esto quiere decir que el glaciar durante el año hidrológico 2012 - 2013 ha perdido una lámina de agua de 333.02 mm o 333.02 mm.eq.agua para toda su superficie.

4.2.4. Comparación con los años precedentes.

Obtenido el balance de masa del periodo 2012 - 2013 se pudo calcular el balance acumulado (S β) del glaciar desde el año 2006, para de este modo determinar cuanta masa en equivalente de agua había perdido el glaciar entre el 2006 y el año 2013.

Año Hidrológico	β_n mm.eq.agua	Sβ mm.eq.agua
2006-2007	161	161
2007-2008	-1577	-1416
2008-2009	-957	-2373
2009-2010	-2921	-5294
2010-2011	-1205	-6499
2011-2012	-127	-6627
2012-2013	-333	-6960

Tabla 15: Balance de masa del Glaciar desde el año 2006 hasta el 2013.

Para lo cual la tabla 15 muestra que existe un valor acumulado (S β) de -6960 mm.eq.agua durante ese periodo. Esto corresponde a que el glaciar ha perdido una capa de agua de 7 metros para toda su superficie desde el 2006 hasta el 2013.

Los siguientes capítulos muestran la aplicación del método fotogramétrico llevado a cabo sobre el glaciar de Charquini Sur en el año 2006 y el año 2013. El resultado del método volumétrico corresponde a un balance de masa acumulado, el cual puede ser comparado directamente con el resultado que nosotros acabamos de obtener.

CAPITULO V: ESTIMACIÓN DE LA SUPERFICIE TOPOGRÁFICA MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA AÉREA

5.1. Principios de la fotogrametría.

Actualmente la definición más aceptada es la que propone la Sociedad Americana de Fotogrametría (ASPRS por su sigla en inglés); la define como el arte, ciencia y tecnología de obtención de relieves de objetos físicos y el medio, a través de procesos de registros, medidas e interpretación de imágenes fotográficas, patrones de energía radiante electromagnética y otros fenómenos.

De acuerdo con Luhman (2006).El propósito fundamental de la fotogrametría es la reconstrucción tridimensional de un objeto en forma digital (coordenadas y elementos geométricos derivados) o forma gráfica (imágenes, mapas, diseños).

Aunque la Fotogrametría ahora incluye el análisis de otros registros tal como patrones de ondas de radio y fenómenos electromagnéticos (percepción remota), la fotografía es todavía el principal origen de información.

5.1.1. Fundamento de la fotogrametría.

El principio de la fotogrametría, consiste en proyectar en forma ortogonal la imagen registrada en una fotografía sobre un plano de referencia, la cual ha sido proyectada sobre el negativo mediante la proyección central, que es usada por las lentes.

En fotogrametría se asume que la proyección central es perfecta pero esta se va deformando hacia los márgenes, por lo cual según Macedo (2009):

- No existe desviación de los rayos de luz que atraviesan los lentes de la cámara.
- La imagen se proyecta sobre una superficie perfectamente plana.
- La relación matemática que relaciona el objeto y su imagen se conoce con el nombre de principio de colinealidad.

5.1.2. Etapas de la fotogrametría.

Para la reconstrucción de un objeto a partir de fotografías o imágenes, es necesario describir el proceso óptico por el que una imagen es creada, esta incluye todos los elementos que contribuyen a este proceso tales como fuentes de luz, propiedades de la superficie del objeto, el medio a través del cual viaja la luz, tecnología del sensor y cámara, finalmente el procesado de la imagen. A continuación se requieren métodos de interpretación de las imágenes y mediciones que permitan a la imagen poder identificar un punto a partir de su forma, brillo o distribución del color. Los valores en la forma de datos geométricos y datos radiométricos pueden ser adquiridos para cada punto de la imagen, esto requiere que los sistemas de medición posean la calidad geométrica y óptica apropiada.

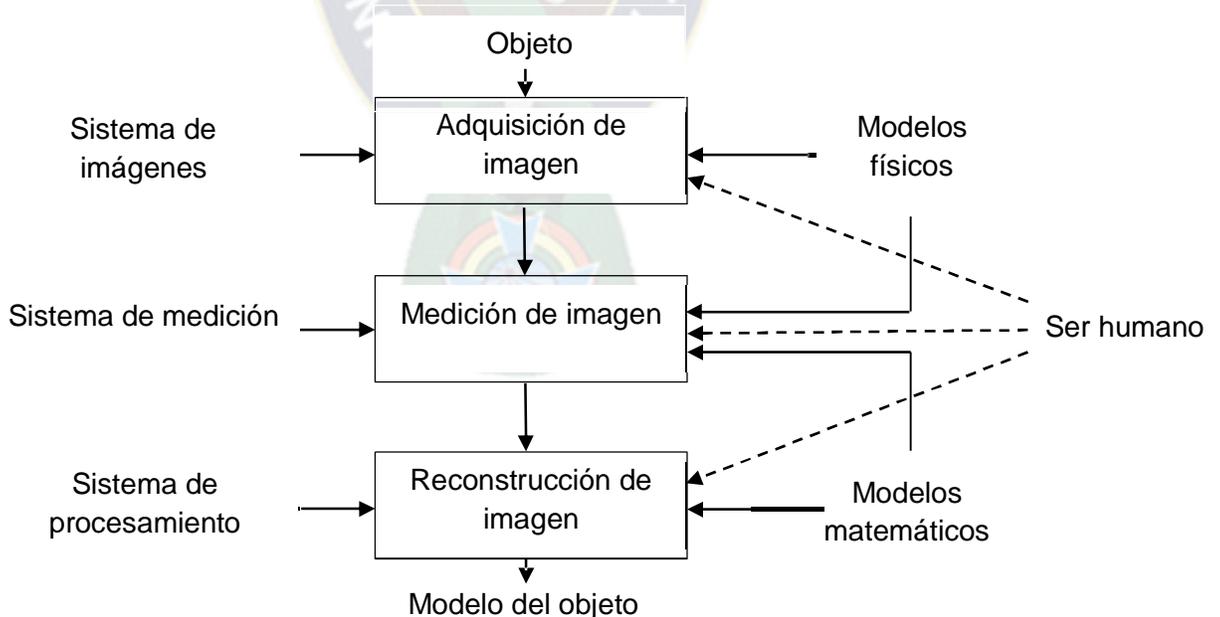


Figura 43: Proceso fotogramétrico del objeto al modelo, donde el objeto es capturado en una imagen, esta imagen es medida para luego aplicar la restitución de su superficie y generar un modelo digital tridimensional donde el ser humano con la ayuda de modelos físicos y matemáticos realiza este proceso (Luhman, 2006).

A partir de estas medidas y una transformación matemática entre la imagen y el espacio del objeto, el objeto puede finalmente ser modelado en tres dimensiones, mediante el principio de la estereoscopia

5.1.3. Estereoscopia.

El principio de la estereoscopia se basa en la convergencia de dos imágenes de un mismo objeto, visto desde diferentes posiciones, logrando una percepción en tercera dimensión. El ser humano logra la visión estereoscópica mediante la convergencia mental de los objetos observados (con los ojos separados a una distancia de 60 a 70 mm), en diferente posición. Los movimientos que realiza el ojo humano para observar un objeto son: acomodamiento y convergencia, la acomodación es la habilidad del ojo de separar el más pequeño detalle y la convergencia la logra a una distancia de 25 cm hasta el infinito (Braulio, 2005).

La imagen tridimensional que se forma en nuestro cerebro, nos permite percibir la profundidad del relieve de forma perfecta o clara. La observación tridimensional de un modelo estereoscópico facilita considerablemente la interpretación de los detalles de los objetos (fotointerpretación en 3D), tanto en su estructura superficial como en su composición material bajo ciertas condiciones (Figura 44).

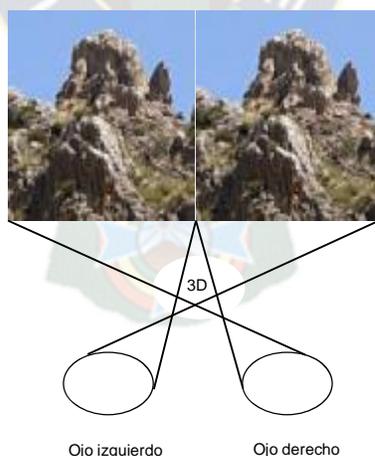


Figura 44: modo de percepción y generación del 3D a partir de la estereoscopia.

Para estudios geológicos esta técnica es ampliamente utilizada por la fotogeología para la identificación e interpretación de las características geológicas del terreno sobre fotografías aéreas mediante el uso un estereoscopio. Según Vargas (1992) para poder

identificar los diferentes rasgos geológicos como ser: lineamientos, estructuras, litología del terreno de manera clara y objetiva es importante realizar una interpretación en tres dimensiones.

5.1.4. Instrumentos de estereoscopia.

Los instrumentos fotogramétricos se clasifican según el método de observación en:

- Estereoscopio de bolsillo.
- Estereoscopio de espejos.
- Anaglifo.

5.1.4.1. Estereoscopio de bolsillo.

Consiste en un par de lentes con unos apoyos, son de tipo convergentes separadas entre sí, por una distancia igual a la interpupilar, normalmente 65 milímetros, montadas en un marco plástico o metálico soportado por patas (Figura 45), de forma tal que las fotografías son observadas a través de dichas lentes. Es un método de observación cansado, ya que hay que observar las fotografías convergiendo los haces hacia el infinito, pero la acomodación de la vista se realiza a la distancia de las fotografías.

Los estereoscopios de bolsillo tienen el defecto de no permitir observar todo el recubrimiento longitudinal. La zona que no se puede observar se denomina zona oscura.



Figura 45: Fotografía de un estereoscopio de bolsillo utilizado para una visión tridimensional.

5.1.4.2. Estereoscopio de espejos.

Consisten en cuatro espejos ubicados de forma tal que las imágenes se transmitan por reflexión hacia los oculares, realizándose la observación de las fotografías en forma ortogonal (Figura 46). Normalmente se les puede adicionar oculares de

aumento, por ejemplo: 3X, 6X, 8X. El aumento de la potencia de los oculares, obviamente reduce el campo de visión.

Las fotografías se colocarán, como ya se ha dicho, alineadas según la dirección de vuelo, separando las imágenes homólogas una distancia igual a la llamada "distancia de base" del estereoscopio, colocándose éste alineado según la línea de vuelo y las imágenes a observar en el centro de los campos de visión. La distancia de base del estereoscopio es la que corresponde a la distancia entre las intersecciones de los caminos ópticos de los pares de espejos con la superficie de observación.



Figura 46: Fotografía de un estereoscopio de espejos utilizado para fotointerpretación de fotografías aéreas.

5.1.4.3. Anaglifo.

Se basa en el fenómeno de síntesis de la visión binocular postulado por Louis Ducos du Hauron en el año 1891, donde se obtiene un par de fotografías de un objeto desde dos puntos de vista diferentes, posteriormente cada fotografía es imprimida cada una con capas de color complementarias superpuestas pero movidas ligeramente una con respecto a la otra para producir el efecto de profundidad y haciendo coincidir sus puntos principales. En la impresión la fotografía izquierda tiene el color azul y la fotografía derecha el color rojo en la observación se colocan lentes coloreados de forma que el ocular izquierdo es rojo y el ocular derecho es azul (Figura 47).

Los anáglifos tienen la ventaja de poderse observar el par estereoscópico por varias personas a la vez.

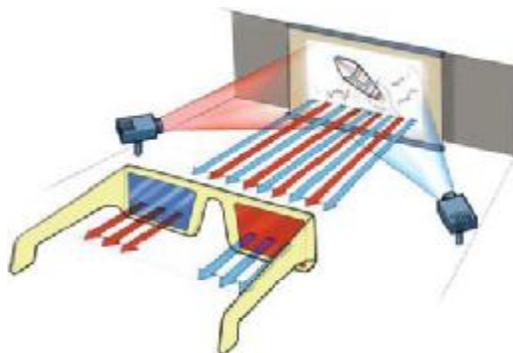


Figura 47: Esquema de la visión anaglífica utilizando un anáglifo para ver imágenes en 3D.

5.1.5. Divisiones de la fotogrametría.

Según Braulio (2005) durante la evolución de esta disciplina en el siglo XX, se fueron desarrollando métodos que se adaptan a campos de aplicación en los que eran requeridos, lo cual llevo al desarrollo e implementación de instrumentos específicos, capaces de llevar a cabo estos métodos especializados. Estos métodos se agrupan en dos grandes grupos dentro de la fotogrametría.

5.1.5.1. Fotogrametría Aérea.

Es aquella que utiliza fotografías tomadas desde una cámara (digital o analógica) aerotransportada, cuyo eje óptico casi siempre es vertical (tolerancia de $\pm 3^\circ$), con una posición en el espacio indefinida. Generalmente, las cámaras usadas son de formato 23 x 23 cm. Otra modalidad que gana importancia la constituye la fotogrametría espacial que utiliza imágenes estereoscópicas tomadas desde satélites de observación de la tierra como las imágenes Spot en el año 1986, imágenes Aster en el año 2000, imágenes Ikonos en el año 2002, imágenes Geoeye en el año 2004, etc.

5.1.5.2. Fotogrametría Terrestre.

Es aquella que utiliza fotografías tomadas sobre un soporte terrestre, donde la cámara es utilizada en una posición tal que el eje de la cámara fotográfica resulta horizontal y paralelo al terreno o corteza terrestre. De tal modo que la posición y los elementos de orientación externa de la cámara son conocidos y están definidas. Antiguamente el instrumento con el que tomaban las tomas era el fototeodolito (Lehmann, 1975)

5.1.6. Productos fotogramétricos.

La fotogrametría genera productos, gráficos, fotográficos y/o digitales, en función de la aplicación que tendrán los mismos. Discriminando estos productos según el proceso y su forma final, se pueden agrupar en los tipos:

- Mapas topográficos o mapas de isolíneas.
- Fotomosaicos.
- Ortofotos.

5.1.6.1. Mapas topográficos o Mapas de isolíneas.

Este es el producto por excelencia de la fotogrametría. Actualmente existen dos modalidades de medios de presentación de los mapas:

- *Los tradicionales*, los cuales son ploteados sobre una mesa de dibujo por el aparato restituidor analógico.
- *Los numéricos*, que son realizados mediante una interface que conecta los movimientos del aparato restituidor para que puedan ser realizados mediante un programa CAD (Computer Assisted Design, por sus siglas en inglés).

Actualmente la interface de entre los movimientos de las fotografías y las digitalizaciones del terreno son realizadas en restituidores digitales. En estos programas, los elementos que conforman la información que se extrae del modelo, se registran mediante puntos, líneas y polígonos, en diferentes capas según su contenido temático (Bases de datos en los Sistemas de Información Geográfica o SIG). Esta información puede editarse y completarse una vez hecha la restitución, por lo que se obtiene un plano digital del terreno.

5.1.6.2. Fotomosaico.

El fotomosaico es un ensamblaje de dos o más fotografías que presentan entre ellas un área común. De acuerdo a Macedo (2009) se clasifican en:

- Controlados: fotos rectificadas y trianguladas.
- No controlados: fotos sin rectificar ni triangular.

5.1.6.3. Ortofoto.

Según Macedo (2009) una ortofoto es una fotografía o un conjunto de fotografías cuyas imágenes de los objetos se encuentran en su verdadera posición planimétrica. Esto se logra mediante un proceso denominado rectificación diferencial, en el cual se eliminan

los efectos de la inclinación y del desplazamiento por relieve, propios de las fotografías. Por ello, las ortofotos son equivalentes a los mapas topográficos en lo referente a su precisión geométrica (Figura 48).

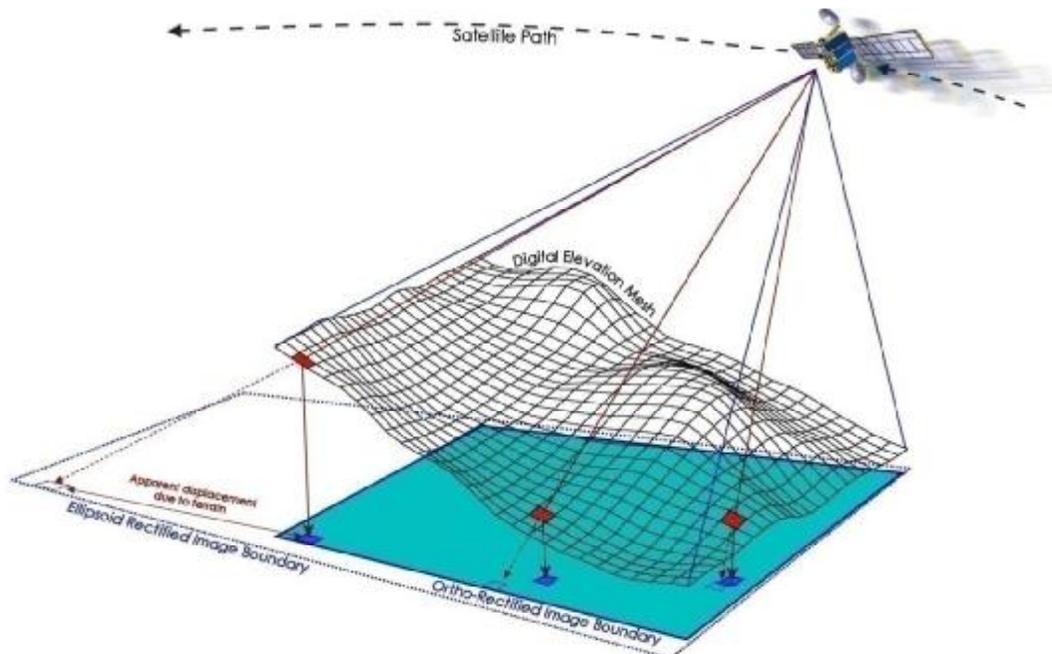


Figura 48: Esquema representativa de orto rectificación de fotografías aéreas, que parte de una proyección cónica (superficie cuadrículada) a una plana (superficie celeste).

5.1.7. Aplicaciones de la fotogrametría.

Una de las primeras aplicaciones de la fotogrametría consistió en la realización de mapas y planos topográficos, Actualmente, se realizan muchos otros tipos de mapas de carácter especial que se utilizan en proyectos y diseño de obras tales como autopistas, carreteras, vías de ferrocarril, puentes, tuberías, oleoductos, gasoductos, líneas de transmisión, presas hidroeléctricas, estudios urbanos, catastral, mapas geológicos, mapas de suelos, mapas forestales, cartografía geológica etc.

Dentro de las disciplinas que se benefician de la fotogrametría podemos mencionar a la arquitectura, en el levantamiento de monumentos y de sitios; la arqueología, en aplicaciones similares a las usadas en arquitectura; la bioestereometría, en el estudio de formas de seres vivos; la construcción naval, la automotriz y la de maquinaria pesada hacen también uso de esta disciplina.

Una importante cantidad de la información cartográfica producida mediante el empleo de la fotogrametría, es utilizada como referencia espacial en bases de datos digitales. Estos, se integran con otros datos obtenidos por diferentes medios, generalmente de carácter cualitativo y descriptivo para conformar sistemas de información geográfica (SIG).

5.1.8. Ventajas y Desventajas de la fotogrametría.

La fotogrametría es una disciplina basada en la reconstrucción en tres dimensiones de la realidad, a partir de imágenes bidimensionales; es por ello que sus ventajas y desventajas están estrechamente ligadas al tipo de registro, y a los métodos y equipos de restitución (Macedo, 2009).

5.1.8.1. Ventajas de la fotogrametría.

- El método reduce costos ya que está en función al tamaño del área a restituir. A partir de las 200 ha de superficie, el método fotogramétrico se torna competitivo frente al método topográfico, aumentando esta competitividad a medida que el área se hace más extensa.
- La fotogrametría reduce el trabajo que se realiza en campo, reduciendo la cantidad de puntos de control necesarios.
- Evita problemas de accesibilidad y condiciones de clima adverso que pudieran presentarse.
- El tiempo requerido para realizar un mapa fotogramétrico es menor comparado con el que requiere el levantamiento topográfico y su posterior trabajo de gabinete.
- Dada la velocidad de obtención de datos con este método, facilita información muy valiosa de eventos en caso de cambios súbitos, como por ejemplo: durante o después de catástrofes naturales.
- El método fotogramétrico puede ser realizado en un variado rango de escalas, dependiendo de la distancia del sensor, del tipo de sensor utilizado, de la disponibilidad de recursos económicos y técnicos. Obteniendo mapas cuando se los requieran con bajo costos y alta precisión.
- Es muy útil para verificar mapas. Ya que las fotos proveen un registro preciso de las características del terreno en la fecha en que fueron tomadas, lo cual permite realizar comparaciones entre fotos de otras fechas para evaluar

cambios en el terreno. Estas fotos también pueden ser utilizadas para otros usos diferentes al del estudio original, ya que además de información cuantitativa, las fotografías pueden proporcionar también información de carácter cualitativo (ej. fotogeología).

- La fotogrametría se puede aplicar en regiones de difícil acceso, donde no pueden utilizarse métodos clásicos como: zonas con paredes empinadas, zonas con inestabilidad, zonas de difícil acceso, glaciares, etc.
- Los objetos pueden ser medidos sin necesidad de estar en contacto o cerca de ellos.

5.1.8.2. Desventajas de la fotogrametría.

- Siempre es necesario realizar un control de campo.
- Para realizar estudios multi-temporales se requiere la obtención de nuevas fotografías.
- Determinar la dirección de una curva de nivel en un terreno plano tiene un alto grado de dificultad, debido a la imprecisión en la colocación de la marca flotante, por lo cual se colocan puntos acotados en la restitución o se complementa con trabajo de campo.
- Cuando no existe un alto contraste (densa cobertura vegetal o nieve) sobre la superficie de visión del terreno es imposible ubicar la marca flotante (no existe una convergencia de los haces de luz de cada fotografía), por lo que se debe presumir una altura promedio con respecto a la superficie.
- Se debe inspeccionar el área de interés, para determinar aquellos elementos que no son visibles de forma clara, o cuya naturaleza exacta no puede ser determinada en el estéreo modelo²²

5.2. Estimación de la superficie del glaciar Charquini Sur en el año 2006 mediante Fotogrametría Aérea.

La obtención de la superficie del glaciar Charquini Sur en un modelo digital de elevación para el año 2006 fue un pilar importante para el desarrollo del trabajo, ya que se constituyó en una "superficie de referencia" utilizado para determinar el balance de masa durante el periodo 2006 – 2013.

²² Es el resultado final que representa la superficie del terreno en tres dimensiones que se obtiene aplicando fotogrametría.

Se utilizaron fotografías aéreas del año 2006 obtenidas del vuelo fotogramétrico ordenado por el IRD y llevado a cabo por el Servicio Nacional de Aerofotogrametría (SNA) en Bolivia, para dicho vuelo se seleccionaron como regiones de interés Negruni-Condoriri y Huayna-Cumbre-Chacaltaya, siguiendo una dirección NW-SE debido a las implicaciones de los glaciares presentes en el área como recursos hídricos e hidroeléctricos para las ciudades de La Paz y El Alto.

El vuelo fue realizado el 12 y 13 de Julio del 2006 a horas 13h15 y 12h00 respectivamente, las fotos fueron tomadas con la cámara analógica métrica (véase 5.1.1.1) de alta precisión RMK TOP 15 (Figura 49) (gran angular A3 Lentes Plegon, apertura máxima F/4, y tecnología FMC) perteneciente al Servicio Nacional de Aerofotogrametría (SNA) de la Fuerza Aérea Boliviana (FAB) a una altura promedio de 4970 m.s.n.m. y una escala aproximada de 1:30000; donde cada una de las fotografías cubre un área aproximada de 7.5 x 7.5 Km.



Figura 49: Fotografía de la Cámara métrica Zeiss RMK TOP 15 (Ramírez, 2011).

5.2.1. Preparación.

Se tuvo que elegir un sistema de coordenadas para que los Dem's (Modelos Digitales de Elevación) generados por restitución fotogramétrica coincidan, se escogió el sistema UTM - WGS84²³ (World Geodetic System) debido a que la proyección UTM corresponde a una proyección conforme apta para los países cercanos al Ecuador y también porque los sistemas actuales GPS trabajan en este sistema de coordenadas.

Para poder comenzar con el proceso se tuvo que seleccionar un par de fotografías donde se encuentre el área de estudio, para lo cual se hizo una búsqueda en todas las fotografías del año 2006 (Figura 50), concluyéndose trabajar con las fotografías N° 144 y 145.

²³ Sistema construido a partir del Elipsoide WGS84

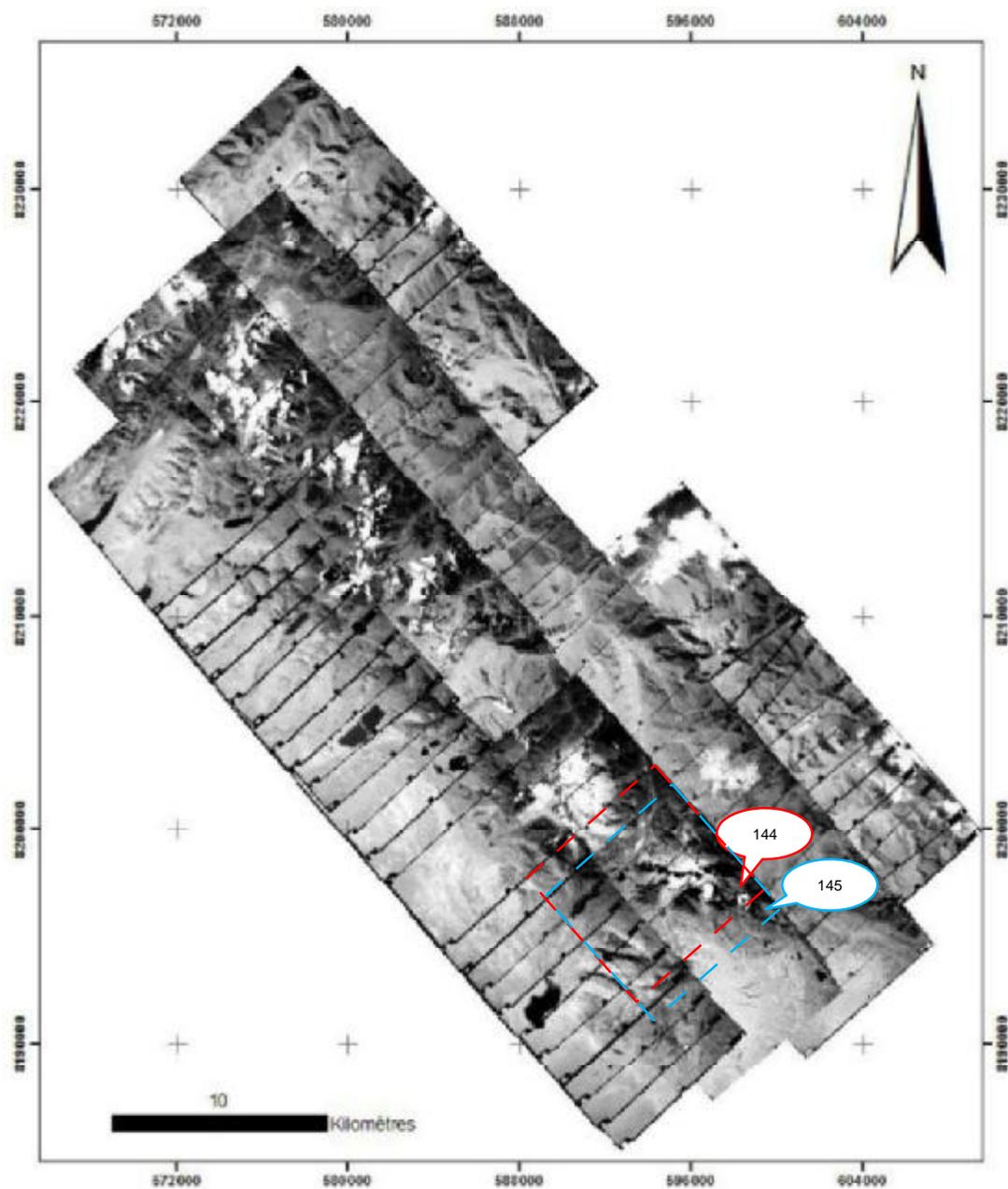


Figura 50: Esquema de las fotografías aéreas del 2006 aerotrianguladas donde se advierten las fotografías 144 y 145 (Soruco, 2012).

5.2.1.1. Puntos de control o apoyo.

Para que las fotografías aéreas tomadas el año 2006 fueran correctamente aerotrianguladas se realizó una red de puntos de control o apoyo que fueron medidos con un GPS diferencial Promark 2 (monofrecuencia con una precisión milimétrica en bases inferiores a los 20Km, pero con importantes lapsos de observación) los puntos fueron ubicados sobre construcciones, cruces de camino, represas y objetos naturales

Del total de puntos de control medidos el año 2006 se seleccionó seis puntos (Tabla 16) para realizar a aerotriangulación correspondiente a las fotografías 144 y 145 las cuales cubren el área de interés.

No de punto	X	Y	Z
10001	590599.670	8195713.610	4605.697
10002	592517.850	8199501.770	4984.346
10003	589027.860	8199239.730	5232.520
10004	593952.190	8203579.130	4239.368
10005	593606.900	8196100.770	4769.374
10006	597230.960	8199143.870	4541.288

Tabla 16: Coordenadas de los puntos de Apoyo para las fotografías 144 y 145.

5.2.1.2. Imagen digital.

Para realizar la triangulación fue necesario tener las fotografías en formato digital para lo cual todas las fotografías aéreas tomadas el año 2006 fueron digitalizadas el 27 de Abril del 2007 por la empresa GEOIMPRO con un scanner fotogramétrico marca Vexcel Ultrascan (Figura 52) con una resolución de 1200 dpi²⁴ correspondientes a 14µm por píxel.



Figura 52: Scanner fotogramétrico VEXCEL Ultrascan 5000 (Ramírez, 2011).

Las imágenes fueron escaneadas en formato *.TIF²⁵ de 16785 píxeles de alto y 16785 píxeles con 270 Mb de tamaño, una resolución espacial excelente para el trabajo de restitución fotogramétrica del Glaciar de Charquini Sur (Figura 53).

²⁴ Dots Per Inch o puntos por pulgada, es la unidad de medida para resoluciones de impresión y escaneado.

²⁵ Formato de archivo de imágenes con etiquetas, es un formato de archivo de gráficos de mapa de bits.

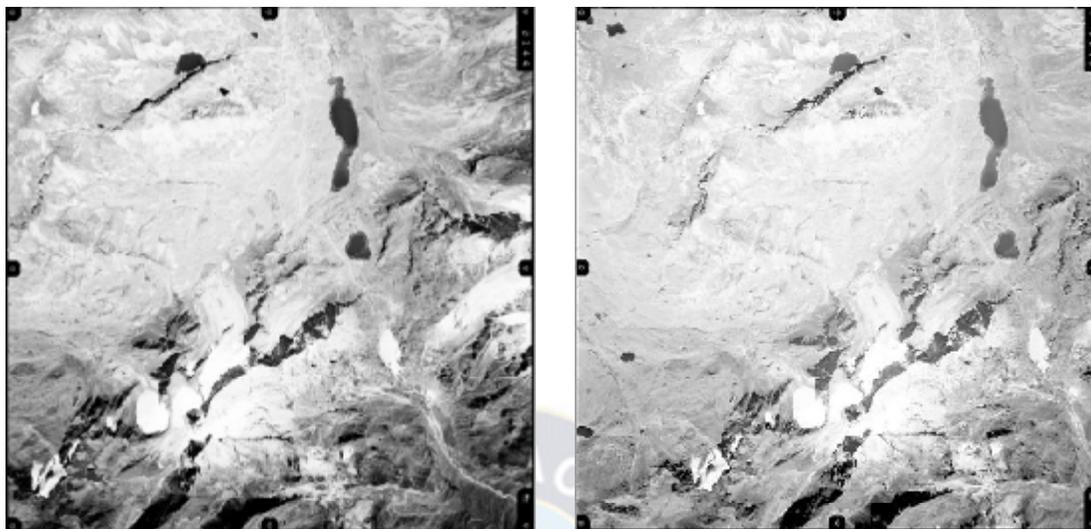


Figura 53: fotografías aéreas 144 y 145 tomadas el año 2006 respectivamente digitalizadas.

5.2.2. Aerotriangulación.

La aerotriangulación es el proceso que tiene por objeto determinar indirectamente los parámetros de orientación del par de imágenes fotográficas (giros ω , ϕ , κ y las coordenadas del centro de perspectiva x_0 , y_0 , z_0 de cada fotografía), a través de la medición de puntos de control, lo que fueron utilizados posteriormente para llevar a cabo la aerotriangulación.

5.2.2.1. Orientación Interna.

La orientación interna nos ayuda a determinar las coordenadas imagen de las fotografías para lo cual es necesario conocer: la distancia focal, la posición del punto principal, la posición de las marcas fiduciales y la función de distorsión de la cámara utilizada.

La cámara métrica Zeiss RMK TOP 15 con la que se tomaron las fotografías aéreas contaba con la información de los parámetros de calibración elaborada en EEUU el año 2002 (generalmente la calibración de una cámara fotogramétrica tiene validez entre 2 a 4 años).

- La posición del punto principal: $X = -0.0100\text{mm}$, $Y = 0.0150\text{mm}$
- La distancia focal es igual a: 152.6710mm

Las marcas fiduciales están distribuidas en las 4 esquinas y 4 lados de cada fotografía del 2006, cuentan con un formato que se muestra en la Figura 54.



Figura 54: Imagen del formato de la marca fiducial No 1 correspondiente a la fotografía aérea 144.

Cada una de las 8 marcas fiduciales de las fotografías 144 y 145 cuenta con coordenadas de su posición en mm (Tabla 17).

No marca fiducial	X (mm)	Y (mm)
1	112.996	0.047
2	-113.001	0.033
3	0.034	113.026
4	-0.039	-112.971
5	113.016	113.052
6	-113.036	-112.954
7	-112.975	113.034
8	112.958	-112.954

Tabla 17: Coordenadas en mm de las marcas fiduciales de las fotografías aéreas del 2006.

Estas coordenadas están medidas tomando al centro de la foto (punto principal) como el origen 0

- Coeficientes de la distorsión de la cámara:
 - Ko = 5.6570000e -05
 - K1 = -5.7650000e -09
 - K2 = 8.1960000e -14

Todos estos valores son introducidos y procesados en el programa de restitución fotogramétrica llamado LPS (Leica Photogrammetry Suite, por sus siglas en inglés) del programa Erdas, donde se realizó la correspondiente orientación interna de las fotos 144 y 145.

5.2.2.2. Orientación Externa.

La orientación externa relaciona geoméricamente las imágenes estereoscópicas definiendo la posición y la orientación angular, formando el llamado "modelo estereoscópico". Las variables que definen la posición y orientación de una imagen son referidas como elementos de la orientación exterior. Los elementos posicionales de la

orientación exterior de las fotografías incluyen 3 movimientos de traslación en X_0 , Y_0 , Z_0 , 3 rotaciones Omega, Phi, Kappa, y el factor de escala.

Estos elementos definen el centro de perspectiva (o) con respecto al sistema de coordenadas espaciales del terreno de cada fotografía (Figura 55). Estos parámetros son determinados empleando las características geométricas del sensor (orientación interna), los puntos de enlace entre los pares estereoscópicos de las fotografías aéreas y los puntos de control posicionados sobre cada fotografía.

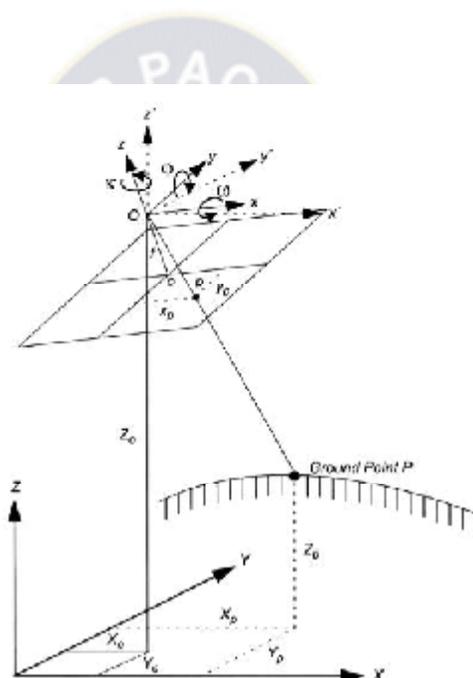


Figura 55: Esquema de los elementos de la orientación externa.

5.2.2.2.1. Medición de los puntos de enlace.

En esta etapa del trabajo y dar curso a la orientación externa se procedió a medir puntos de enlace también conocidos como TIE²⁶ points, en el par estereoscópico formado por las fotografías No 144-145 del año 2006. Esto fue llevado a cabo con la herramienta *Point Measurement* del LPS²⁷, la cual nos proporciona una ventana con dos grupos de recuadros: el izquierdo para la foto 144 y el derecho la foto 145, cada cuadro cuenta con 2 zoom's para obtener un acercamiento óptimo. Se marcaron puntos de enlace en ambas fotos generando una red de 25 puntos y posteriormente se

²⁶ Puntos de enlace utilizados para enlazar fotografías.

²⁷ Leica Photogrammetry Suite o comúnmente conocido como LPS es un programa especializado en fotogrametría digital dentro del programa ERDAS.

procedió a la medición automática de estos puntos gracias a la herramienta *Automatic Tie Point* con la cual se obtuvo una cantidad de 436 puntos una cantidad de puntos óptima para realizar la Aerotriangulación (Figura 56).

5.2.2.2.2. Medición de los puntos de Control.

Para poder obtener los parámetros de la orientación externa XYZ y los giros κ , φ , ω más el factor de escala de cada fotografía fue necesario introducir los puntos de control medidos (véase 4.2.1) a la herramienta *Point Measurement* del LPS y posteriormente marcar cada punto de control fue sobre ambas fotografías, de este modo se genera la relación de las coordenadas terreno con las coordenadas imagen en el par fotográfico (Figura 56).

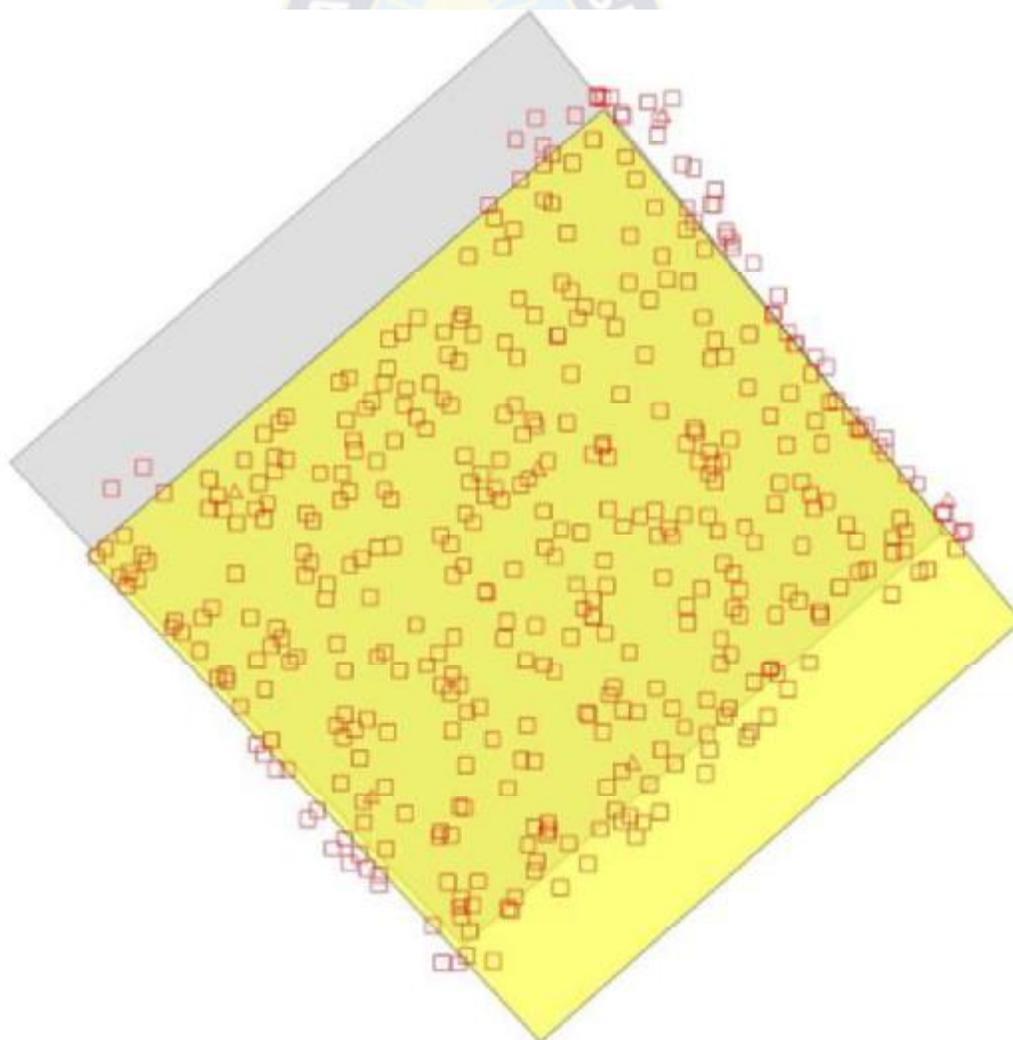


Figura 56: La figura muestra todos los puntos de enlace representados con recuadros rojos, los puntos de control representados con triángulos rojos.

Finalmente llevamos a cabo la triangulación con la herramienta *Aerial Triangulation* del LPS, con la cual se realizó la triangulación, donde todos los haces de luz convergieron en el punto principal de cada fotografía, en la Figura 57 podemos ver que nuestro par de fotografías ya se encuentran orientadas respecto al Norte, correctamente enlazadas (con un recubrimiento del 80% aproximadamente) y también se puede apreciar la dirección o ruta de vuelo correspondiente al año 2006 (N45°W - S45°E), el margen rojo muestra el borde de cada fotografía y el margen amarillo representa a la zona de visión estereoscópica.

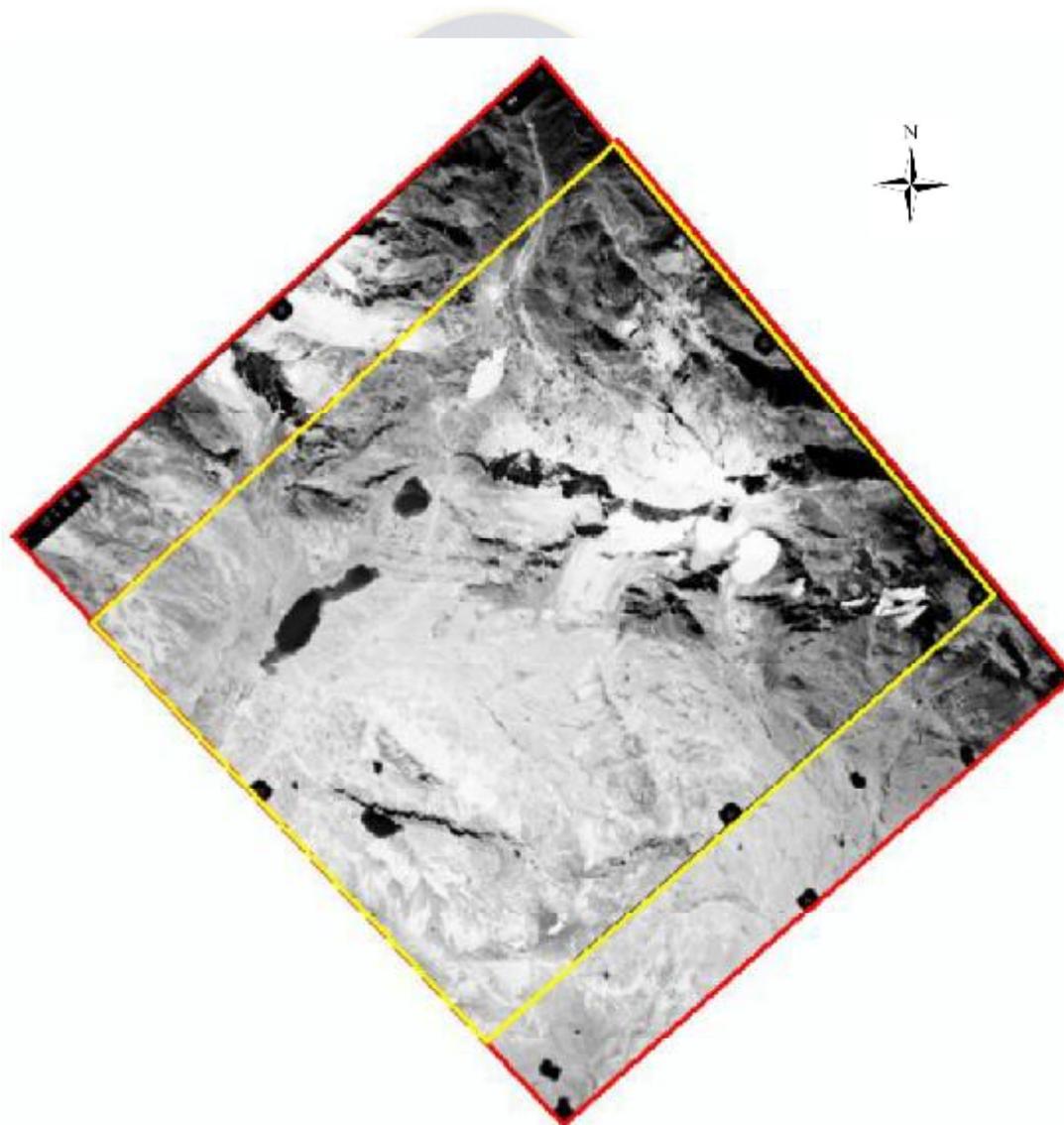


Figura 57: Imagen del par fotogramétrico luego de la triangulación, margen superior izquierdo fotografía 144, margen inferior derecho fotografía 145.

5.2.3. Restitución fotogramétrica.

La restitución fotogramétrica se define como el proceso que se realiza para transferir toda la planimetría y altimetría de un modelo estereoscópico a un plano ortogonal con escala, es decir que la restitución implica la conversión de la proyección cónica de la fotografía aérea a la proyección ortogonal en el plano, con los debidos ajustes de escala, posición y de esta forma se obtiene un modelo espacial de la superficie restituida (Braulio, 2005).

El método de medición fue manual (debido al bajo contraste fotográfico, sobre glaciares es prácticamente imposible llevar a cabo una estéreo-correlación automática), en el cual observando puntos homólogos en ambas tomas se genera una malla de puntos, la densidad de esta malla de puntos de restitución depende de la pendiente y del contraste entre pixeles de la zona que estamos restituyendo. Para tal efecto empleamos un método discreto de medición de puntos aislados, en donde se ajustó manualmente el paralaje horizontal punto por punto "z" haciendo converger las marcas flotantes de cada fotografía en un mismo punto.

Esta etapa del trabajo fue realizado en el programa ArcGis utilizando la extensión *Stereo Analys* de Erdas, la cual nos permite, por medio de la herramienta *Stereo Window*, generar una visión estereoscópica mediante anáglifos en 3 dimensiones de las fotografías 144 y 145 (Figura 58) sobre se generó la red de puntos con coordenadas x,y,z.

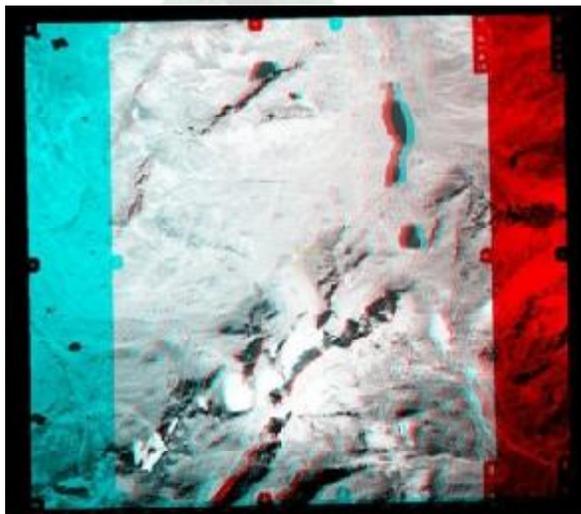


Figura 58: Arreglo del par estereoscópico en el visor *Stereo Window* (fotografía 144 de color rojo y fotografía 145 de color azul).

La imagen estereoscópica que nos presenta la ventana del *Stereo Window* constituye la interface 3D de ArcGIS que nos muestra el par estereoscópico desplegado de manera simultánea (fotografía 144 en rojo, y fotografía 145 en azul). Este despliegue permite observar ambas fotografías del par que fueron obtenidas desde posiciones diferentes y en 3 dimensiones denominada visión anaglífica. (Ver sección 5.1.4.3). De este modo se llevó a cabo la medición de los puntos vectoriales (Figura 59) para obtener el modelo digital de elevaciones.

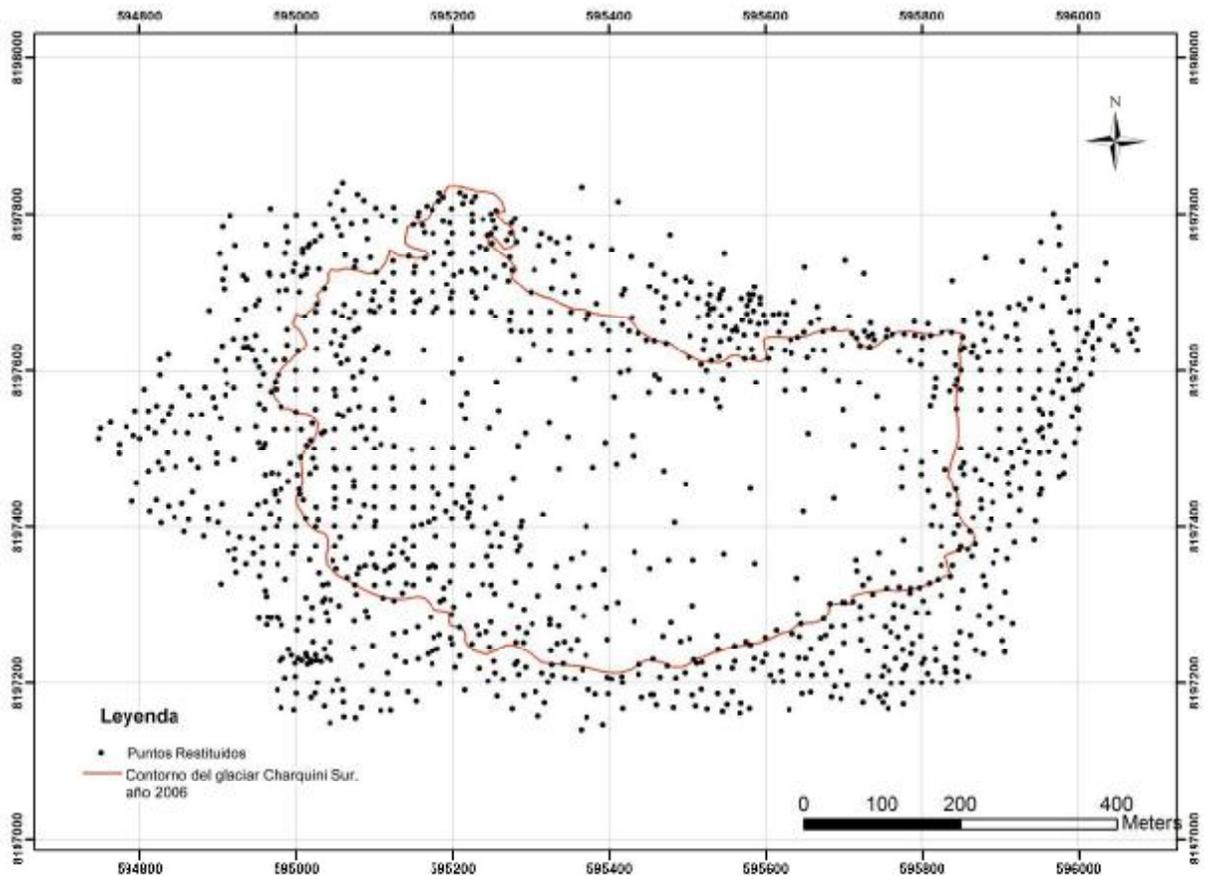


Figura 59: Mapa de los puntos medidos mediante restitución fotogramétrica del glaciar.

Al realizar la medición de puntos por restitución se tuvo que:

- Sobre afloramientos rocosos existió excelente contraste.
- Sobre el glaciar se tuvo dificultad al medir puntos, específicamente en sectores con presencia de nieve masiva de color claro con ausencia de contraste.

Por lo tanto se procedió a utilizar la herramienta *terrain editor*²⁸ en ArcGis, esta herramienta toma a los puntos restituidos para generar de manera automática una red irregular de triángulos (Triangulación de Delaunay²⁹) o TIN (Triangular Irregular Network, por sus siglas en ingles) en donde las líneas o lados de dichos triángulos son interpolados en función a la altura de sus aristas (puntos restituidos) para generar curvas de nivel.

Las curvas de nivel (Figura 60) son modificadas y/o recalculadas automáticamente por la herramienta *terrain editor* inmediatamente al generar o eliminar un punto restituido de la red de puntos es decir, que las curvas de nivel están en función a la disposición de los puntos que se restituyen. De esta forma, fue posible generar un Modelo Digital de Elevación en sobre una superficies de bajo contraste donde la precisión en algunos sectores es relativa debido a la poca cantidad de puntos consecuencia de un bajo contraste fotográfico que existe sobre la nieve masiva.

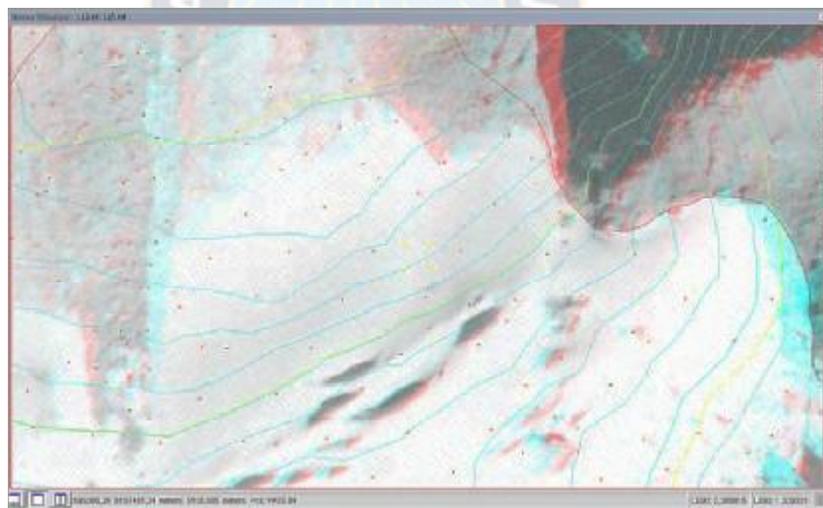


Figura 60: Imagen de la aplicación del Terrain Editor utilizada para la corrección de puntos restituidos, se observa la red de puntos que generan las curvas del nivel color azul y verde, en el Glaciar Charquini Sur.

El *terrain editor* también ayudó a corregir varios puntos anómalos (mal restituidos inicialmente) y a completar áreas donde era difícil lograr mediciones, con lo que se logró obtener el DEM en formato vector del Glaciar Charquini Sur (Figura 61).

²⁸ El Terrain Editor es una extensión Erdas para Argis que permite editar superficies de una geodatabase.

²⁹ Es una red de triángulos que se caracteriza por formar los triángulos más equiláteros posibles.

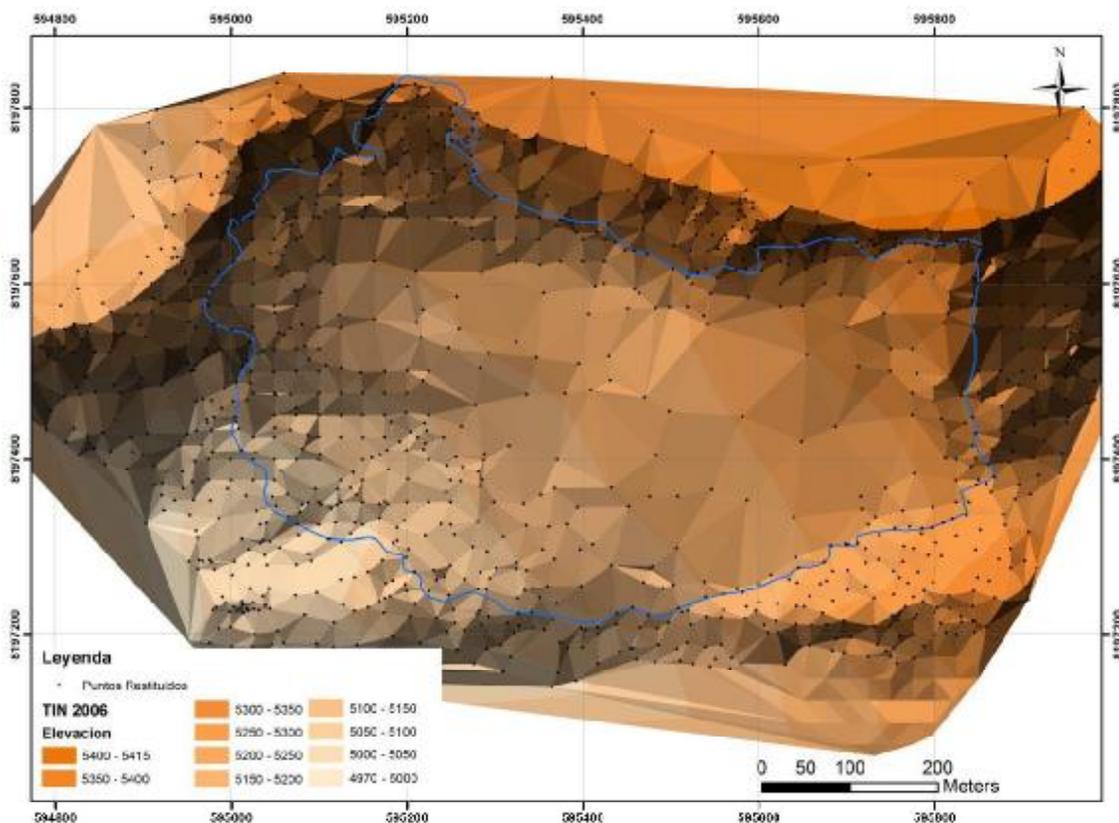


Figura 61: Arreglo irregular de triángulos de Delaunay (TIN) que modelan el glaciar Charquini Sur para el año 2006 visto en planta.

La Figura 61 corresponde al modelo que se obtuvo luego de la restitución fotogramétrica de las fotografías 144 y 145 del año 2006, donde la red de puntos restituidos actúa como nodos o vértices con coordenadas en XYZ, dichos nodos se unen para formar una red irregular de triángulos conocido como TIN generando de esta manera una superficie en tres dimensiones que representa la superficie del glaciar Charquini Sur para el año 2006. La línea roja representa el contorno del glaciar para ese año (Figura 62).



Figura 62: Modelado del glaciar Charquini Sur visto desde el SW.

El TIN es una representación basada en vectores de la superficie física de la tierra, considerado como un Dem de carácter primario (porque se utilizan valores medidos, no existe una interpolación de "nuevos" valores) la figura 62 representa el modelo tridimensional desplegado con el programa ArcScene³⁰.

5.2.4. Construcción del Dem 2006.

El modelo digital de elevación (Dem) es un modelo digital en 3 dimensiones que representa alguna región de la superficie de la Tierra, se elabora a partir de datos de elevación del terreno (red de puntos en 3D obtenidas por fotogrametría, por GPS, por mediciones taquimétricas o por mediciones Laserscan³¹), representado en formato Vector (TIN) o Raster (red o grilla). Los Dem Raster son considerados como Dem's de carácter secundario (porque se realiza una interpolación de valores).

Para generar el Dem correspondiente al 2006 se ha utilizado el programa SURFER³² donde el modelo digital fue generado utilizando una interpolación Kriging³³, (método elegido porque se ajusta mejor a las condiciones del modelo, debido a la poca cantidad

³⁰ Es un visor 3D de Arcgis.

³¹ Es un dispositivo que analiza un objeto o una escena para construir modelos digitales tridimensionales.

³² Es un programa para hacer mapas y trazar líneas de contorno en 3D, convierte los datos en mapas con contorno, superficie, vector, imagen y sombras.

³³ Kriging es un procedimiento geoestadístico avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersados con valores z

puntos en algunos sectores del glaciar), con un espaciado de 5 metros entre vértices utilizando los siguientes límites para la grilla de interpolación (Tabla 18):

Dirección	Mínimo	Máximo
X	594800	595900
Y	8197200	8197835

Tabla 18: Coordenadas de los límites utilizados para generar el modelo Dem.

Una vez generado nuestro Grid se generó un *Contour Map* o mapa de curvas de nivel del Glaciar Charquini Sur en base a la malla de puntos generada por interpolación con un espaciado de 5 m entre ellas. La Figura 63 nos presenta el resultado de esta interpolación.

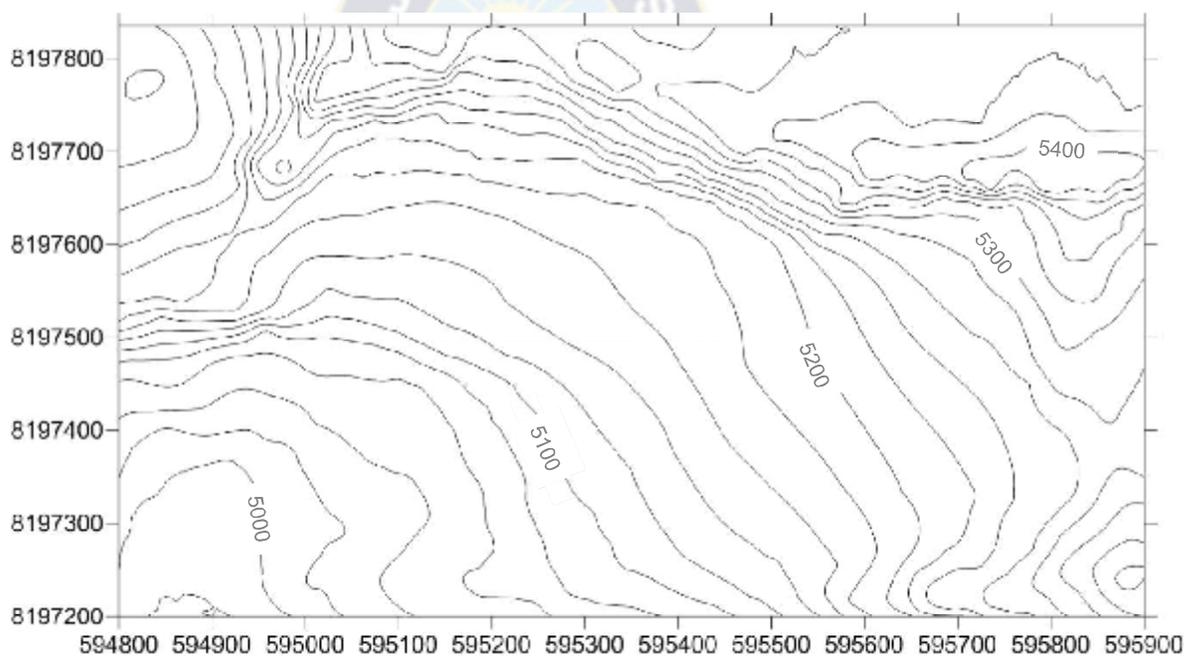


Figura 63: Mapa topográfico de la superficie del Glaciar en el año 2006.

Otra forma de visualizar el modelo digital interpolado es utilizando la herramienta *Wireframe* del programa *SURFER*, donde se puede apreciar el modelo digital desplegado en una grilla regular con un espaciado de 5 m, donde cada cuadrícula corresponde a un valor altitudinal (Figura 64). En cambio en un TIN las facetas de los triángulos son generadas de manera completamente irregular en el modelado de la superficie 3D que queremos representar. Ambos formatos de Dem tienen usos muy particulares.

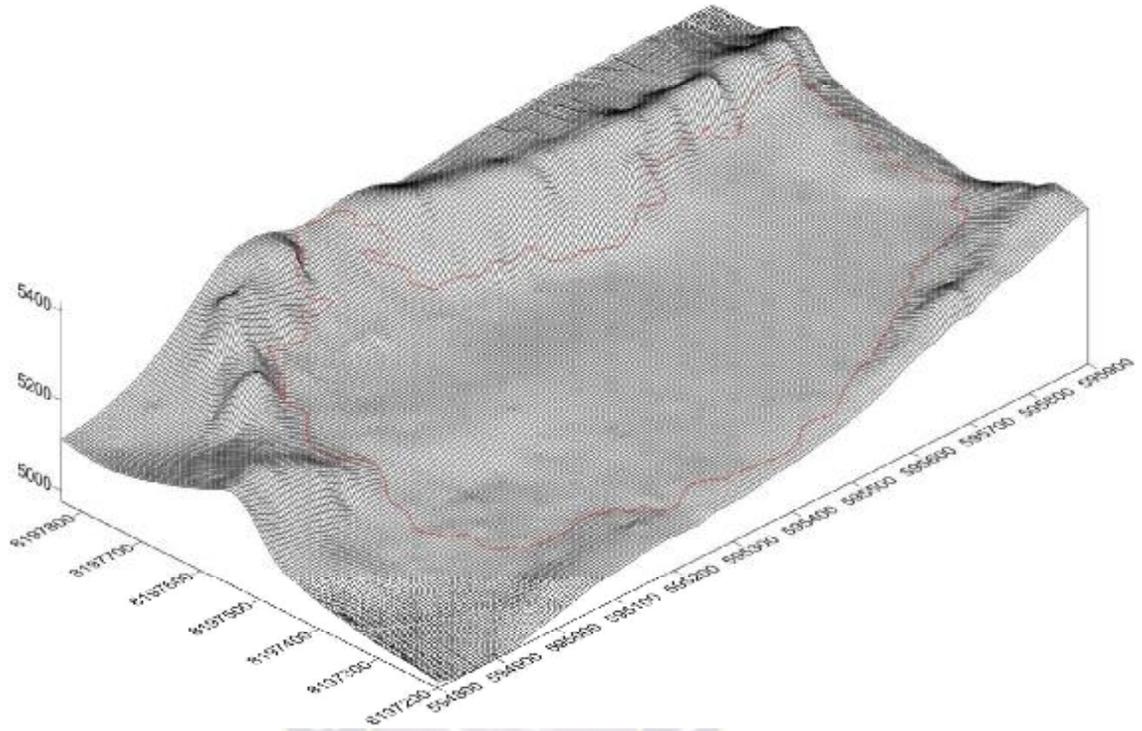


Figura 64: Imagen en 3D del modelo Raster del glaciar Charquini Sur 2006, la línea roja representa el contorno glaciar para ese año.



CAPITULO VI: APLICACIÓN DE UNA NUEVA METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA SUPERFICIE TOPOGRÁFICA MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA TERRESTRE.

La fotogrametría permite cartografiar elementos de la realidad en modelos 3D por medio del procesado de imágenes fotográficas. Al igual que la metodología utilizada en el capítulo V con fotogrametría aérea, en este capítulo utilizando fotogrametría terrestre se buscó encontrar la geometría y la posición original de las fotografías en el momento de su adquisición para dar paso a la restitución. Para su ejecución fue necesario llevar a cabo las siguientes fases:

- Preparación.
- Adquisición.
- Preparación de las fotografías.
- Triangulación.

6.1. Preparación.

En esta etapa se realizaron las mediciones correspondientes para determinar la geometría interna de la focal de la cámara con el fin de obtener sus parámetros físicos y de distorsión. Se realizó la planificación para la instalación y medición de los puntos de control necesarios para la obtención de fotografías del área de estudio correspondiente el año 2013.

6.1.1. Calibración.

La calibración, desde el punto de vista fotogramétrico, es el proceso mediante el cual se trata de determinar los parámetros geométricos (distancia focal y coordenadas del punto principal) y físicos (parámetros de la distorsión radial y tangencial) de la cámara para la adquisición fotográfica.

6.1.1.1. Cámaras bajo el punto de vista de la calibración.

Se acuerdo con Sánchez (2004) el proceso de calibración de las cámaras fotográficas determina la siguiente clasificación:

- **Cámaras métricas:** son aquellas en las que el fabricante de la cámara realiza una calibración de precisión en laboratorio y ofrece un certificado de los valores de la distorsión para la focal de la misma.
- **Cámaras amateur:** son las cámaras comunes y corrientes del mercado, su focal no está calibrada, y si son utilizadas para fines métricos (fotogrametría) es imprescindible recurrir a algún procedimiento de calibración.
- **Cámaras semi-métricas:** Son más estables que las anteriores, a las que se le añade, entre las lentes y el plano de la película, una retícula con unas marcas fiduciales perfectamente conocidas. De manera que cada vez que se use la cámara se pueden utilizar estas marcas impresas en la película para determinar la posición del punto principal y la deformación del plano de la película a la vez que se realiza el resto del proceso fotogramétrico. En el caso de cámaras digitales, la placa del sensor, si tiene la suficiente garantía de fabricación, puede interpretarse como una retícula formada por la matriz de píxeles de coordenadas imagen dadas por la fila y la columna de cada píxel.

6.1.1.2. Cámara fotográfica digital.

Para el trabajo, se ha utilizado una cámara semi-métrica digital, la Canon EOS 5D Mark II (Figura 65) perteneciente al proyecto "GREAT ICE" del IRD, se trata de una cámara de prestaciones profesionales convencional de gama alta, de fotograma completo, con una resolución de 21.1 megapíxeles (5,616 × 3,744 píxeles). La tamaño

de píxel en el CCD es de 6.4103 μm . El CCD posee una matriz de filtro de color tipo GRGB para la generación de los 3 canales RGB que forman una imagen en color. El cuerpo está protegido por una aleación de magnesio, el cual ofrece condiciones ideales para la adquisición de fotografías en cuanto a calidad, control de brillo, contraste y nitidez.



Figura 65: Fotografía de la cámara canon EOS 5D MARK-II vista de frente.

Se hizo una selección de varios objetivos, entre las cuales primeramente se utilizó un objetivo con distancia focal de 15 mm pero al realizar la calibración correspondiente que constato la presencia de demasiada distorsión; seguidamente un objetivo con distancia focal de 50 mm pero esta también presentaba distorsión y abarcaba un rango de visión demasiado reducido (Ver 6.1.2), finalmente se decidió utilizar el objetivo a focal fija canon EF 20 mm/F2.8 (Figura 66) la cual posee un amplio ángulo de visión de 94° y una profundidad de campo ampliada.



Figura 66: Fotografía del objetivo a focal fija canon EF 20mm/F2.8 vista de costado.

Las principales características técnicas del objetivo utilizado son presentadas en la Tabla 19.

Tamaño de pixel	6.4103 μm
Distancia Focal	20 mm
Construcción de los lentes	11 elementos en 9 grupos
Abertura Máxima	1:2.8
Angulo diagonal de observación	94°
Sistema de ajuste de enfoque	Sistema USM
Distancia mínima de enfoque	0.25 m
Tamaño de filtro	72 mm
Diámetro Máximo - largo - peso	77.5x70.6mm – 405g

Tabla 19: Características técnicas del objetivo canon EF 20mm/F2.8 utilizado en el trabajo.

6.1.1.3. Modelo geométrico de la cámara.

La transformación geométrica de un objeto tridimensional en un objeto bidimensional en el plano imagen de la cámara obedece a las leyes de la proyección perspectiva o proyección central, en la que los rayos de luz procedentes del objeto pasan a través del centro de proyección o centro óptico de la cámara y se plasman en la película o el sensor (Sánchez, 2004)

Básicamente la formulación matemática trata de relacionar linealmente las coordenadas tridimensionales del punto en el mundo real (x,y,z) con sus coordenadas 2D en el plano imagen (x,y). Si usamos coordenadas homogéneas se define la matriz de transformación de perspectiva en la notación matricial como:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$$

Los parámetros a calibrar según el modelo serían las coordenadas del punto principal "P" y la focal. En algunas notaciones el primero se calcula en función del formato del sensor o el negativo y en otras se toma respecto al teórico origen (0,0) del punto principal (Sánchez M. , 2004).

6.1.1.4. Modelo de distorsión.

Si se asume que los componentes ópticos de la cámara son perfectos, la transformación entre la imagen bidimensional y el objeto tridimensional en el espacio sería perfectamente lineal y fácil de resolver. Pero según Sánchez (2004) las lentes de

un sensor producen distorsiones que no son lineales y que afectan a la precisión de la transformación.

Existen dos tipos de distorsiones:

- La distorsión radial desplaza los puntos de la imagen radialmente a partir del centro, causado por el incorrecto pulido de la lente.
- La distorsión tangencial o descentrada desplaza los puntos perpendicularmente a la línea radial, causado por la falta de alineación entre los componentes ópticos.

Para realizar la calibración de los objetivos la ISPRS (Sociedad Internacional de Fotogrametría y Teledetección, por sus siglas en ingles) propone el llamado modelo "balanceado":

$$dr = a_1 r(r^2 - r_0^2) + a_2 r(r^4 - r_0^4)$$

Dónde:

dr : distorsión radial considerada como el desplazamiento, medido a lo largo de un radio del plano imagen, entre la posición de un punto en la imagen y su posición ideal según el modelo matemático

r : es el radio desde el punto al punto principal y por último,

r₀: es el valor escogido para el radio para el cual la distorsión se anula.

Frente a este modelo se utiliza el modelo "gaussiano" definido por:

$$dr = K_1 r^3 + K_2 r^5$$

Ambos son modelos polinomiales que dependen de la distancia focal, que a su vez es desconocida.

6.1.2. Calibración geométrica de objetivos para la cámara canon EOS 5d Mark-II.

La calibración de la cámara fue llevada a cabo utilizando los objetivos de focal fija de 15mm, 50mm y 20mm, con el objetivo de determinar los parámetros físicos y de distorsión de dichos objetivos que serán desarrollados más adelante, en base a tomas fotográficas tomadas a un panel de calibración en diferentes posiciones cuya cantidad de fotografías fue aleatoria pero no menor a 7 ya que no se tendrían resultados precisos y confiables.

6.1.2.1. Panel de calibración.

El panel utilizado para calibrar las focales fue hecha a partir de una lámina de papel de 0.85 m x 1.20 m donde se ha impreso una malla cuadriculada en la cual cada cuadrado mide 0.05 m x 0.05 m, finalmente esta lámina fue pegada sobre una tabla de trupan³⁴ con las mismas dimensiones de 0.05 m de espesor lo cual garantizó su rigidez.

6.1.2.2. Calibración del Objetivo con focal de 15 mm.

Para la calibración del objetivo con focal de 15 mm se procedió a la toma de 23 fotografías del panel desde varias perspectivas angulares y posiciones para calcular las diferencias (Figura 67).



Figura 67: Fotografías del panel tomadas desde diferentes posiciones, para realizar la calibración del objetivo de 15 mm.

Las fotografías fueron tomadas a 1 m de distancia promedio y con un ajuste de la focal que no se encuentra en el infinito, ya que si colocamos la focal al infinito el tamaño del panel se reduce demasiado, y sería prácticamente imposible calibrar todo el lente de la cámara.

³⁴ El trupan es un tablero hecho con fibras de madera obtenida de troncos de Pino Radiata.

Luego se realizó el cálculo empleando el programa *Calibration Toolbox*³⁵ de *MATLAB*, la Figura 68 presenta los parámetros extrínsecos de la cámara en el momento de las tomas fotografías donde la Figura 68.a representa estos parámetros con la cámara centrada, la cámara en una posición fija y al tablero en diferentes posiciones (representado por planos de diferentes colores y con sus respectivos números), mientras que en la Figura 68.b podemos ver que el tablero está centrado en una posición fija y la cámara está en todas las posiciones originales desde donde se tomaron las fotografías (con los respectivos números).

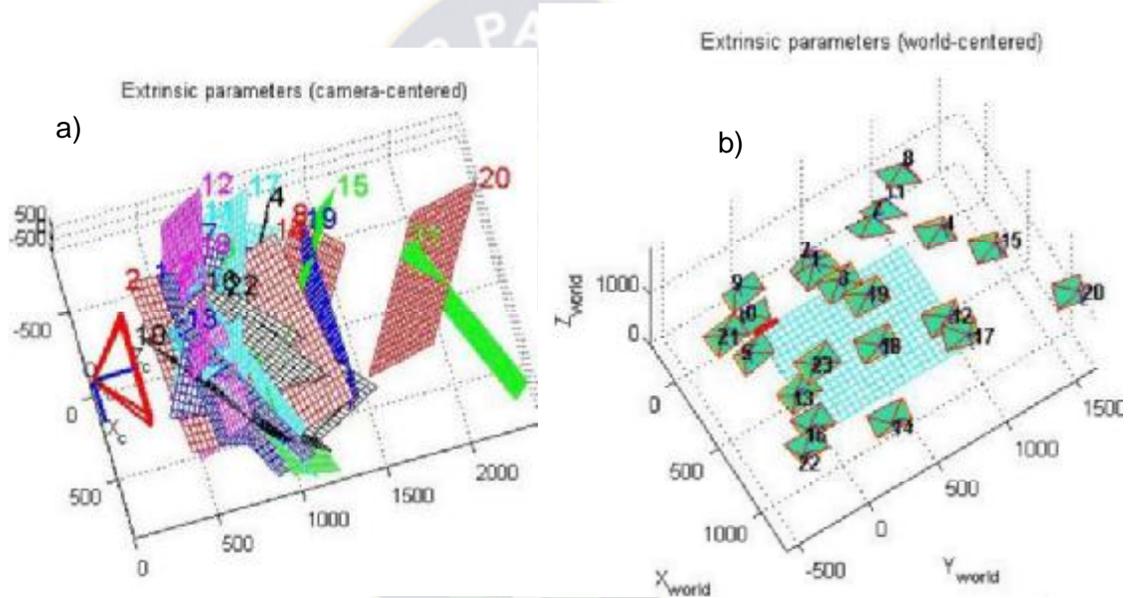


Figura 68: diagramas generados por MatLab donde se presenta los parámetros extrínsecos de las tomas hechas con la focal de 15 mm visto desde arriba.

El modelo de distorsión calculado es presentado en la Figura 69, donde todos los valores de la calibración están en píxeles, por lo tanto si observamos la distancia focal en x, y tenemos un promedio de 2298.475 píxeles que equivale a 14.7339 mm de distancia focal. En este caso como podemos advertir que la distancia focal del objetivo declarado por el fabricante era de 15 mm sin embargo y luego de la calibración tenemos que la distancia focal es de 14.73 mm. Al trabajar en fotogrametría, la variación de unos milímetros en la distancia focal puede ocasionar grandes errores en

³⁵ Es un módulo libre *Calibration Toolbox* del programa *MATLAB* desarrollada por Jean-Yves Bouguet en el año 1999 (http://vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html).

la determinación de las coordenadas en Z de los objetos de interés restituidos en las fotografías.

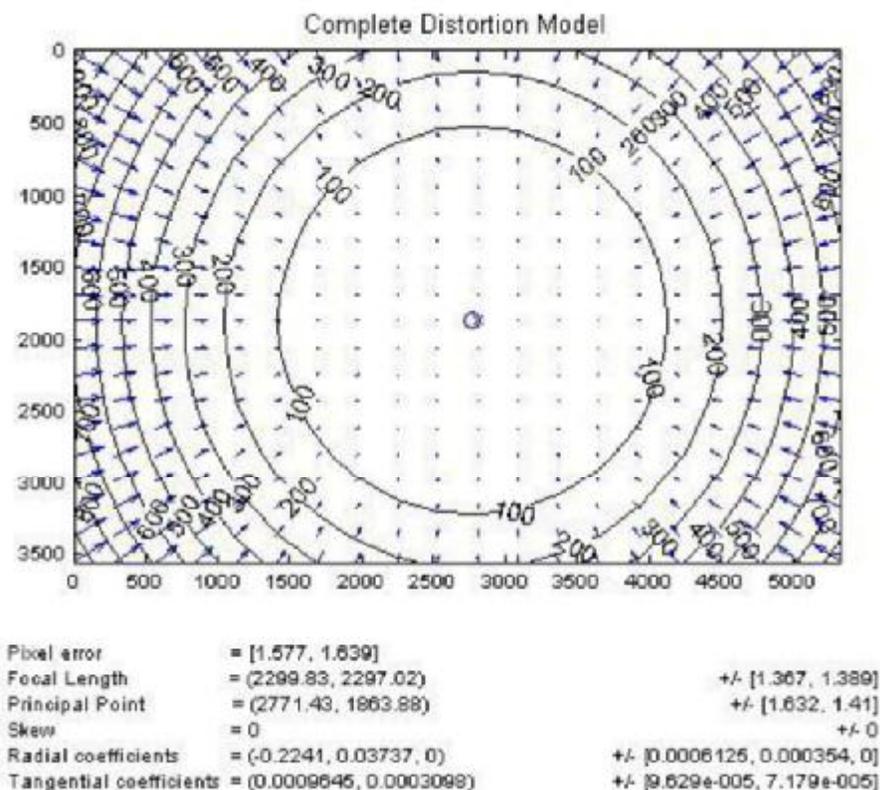


Figura 69: Modelo de distorsión completa calculada por el programa MATLAB

La distorsión radial del objetivo se observa en la Figura 69, se dispone a manera de circunferencias con su respectivo valor en pixeles, el objetivo con distancia focal de 15 mm posee una elevada distorsión que va desde los 100 pixeles (cercano al centro de la fotografía) hasta los 800 pixeles (hacia los bordes de la fotografía) equivalente a una deformación de 5.128 mm (1 pixel = 0.0064103 mm) en esta zona marginal, que se traduce en un desplazamiento de la posición real de los objetos. Este valor es demasiado grande, por lo tanto su uso fue descartado para el trabajo.

6.1.2.3. Calibración del Objetivo con focal de 50 mm.

Luego de obtener los resultados de calibración del objetivo con focal de 15 mm se eligió otro objetivo con una focal de 50 mm. Para realizar la correspondiente calibración se procedió a la toma de 17 fotografías del panel (Figura 70), desde diferentes perspectivas angulares y posiciones a una distancia promedio de 2,5 m con un

enfoque que no se encontraba en el infinito, dichas fotografías reflejan que se tiene una mínima deformación geométrica ya que el tablero mantiene su forma original.

En la Figura 71.a se puede apreciar los parámetros extrínsecos de las tomas fotográficas, donde la cámara es representada por una pirámide roja enfocada hacia el panel, y el panel es representado por un plano con la respectiva grilla cuadriculada.

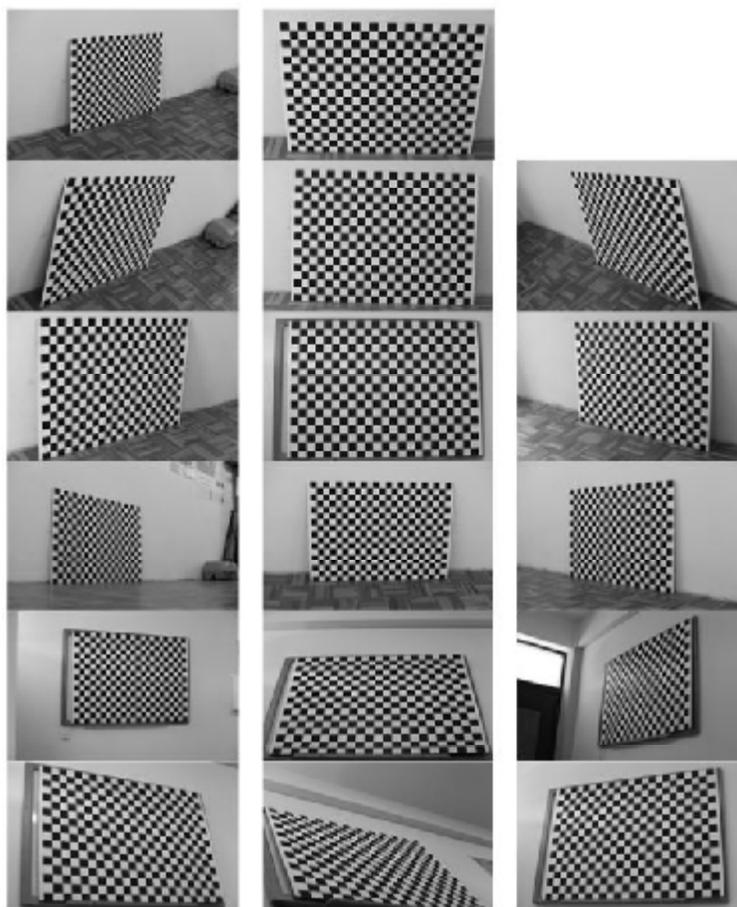


Figura 70: Fotografías del panel desde diferentes posiciones, para realizar la calibración del objetivo 50mm.

La Figura 71.b se observa los parámetros extrínsecos con la focal 50 mm en el momento de las tomas fotografías.

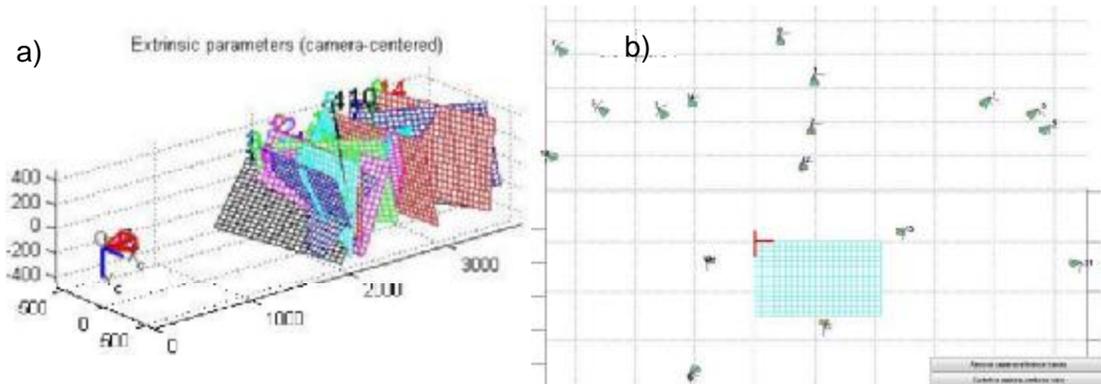


Figura 71: Diagramas generados por MatLab donde se presenta los parámetros extrínsecos de las tomas hechas con la focal de 50 mm.

Las fotografías procesadas por el *Calibration Toolbox* en *MATLAB* dieron como resultado el modelo de distorsión de la cámara (Figura 72).

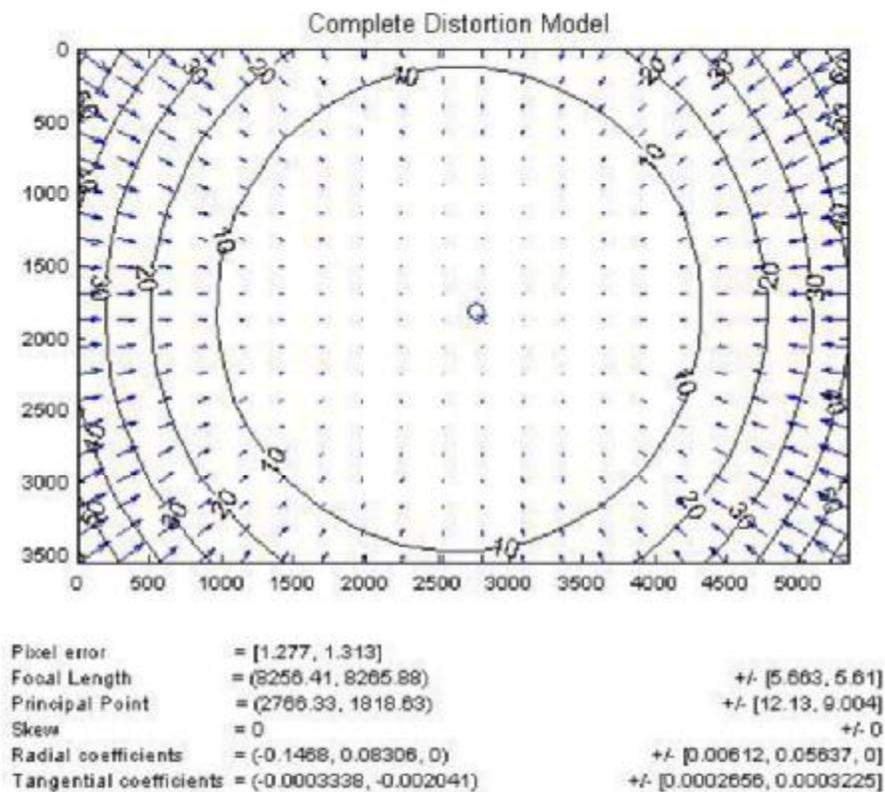


Figura 72: Modelo de distorsión para la calibración de la focal de 50mm.

Como se puede apreciar en la Figura 72, el modelo de distorsión obtenido para el objetivo con focal de 50 mm presenta menor distorsión que con el objetivo de 15 mm donde el primer círculo del modelo de distorsión tiene 10 píxeles de distorsión y hacia

los bordes de la fotografía podemos observar que la deformación se incrementó hasta los 50 píxeles lo que corresponde a 0.32 mm. Este error a diferencia del error obtenido con la focal de 15 mm es mucho más aceptable para el trabajo que deseamos realizar ya que el desplazamiento del objeto real es menor.

Considerando los resultados obtenidos de las mediciones realizadas sobre el panel a una distancia focal que no se encontraba enfocada al infinito, se procedió a calibrar el objetivo de 50 mm con un enfoque al infinito, de esta manera se asemeja esta calibración a las condiciones que tendremos sobre el terreno en el momento de la toma fotográfica sobre el glaciar de Charquini Sur.

6.1.2.4. Calibración del objetivo con focal de 50 mm al infinito.

Para la calibración de la focal se utilizó como panel de referencia una red de marcas de control instaladas en los edificios de las carreras de Geología y Geografía de la facultad de Ciencias Geológicas ubicadas en el campus universitario de Cota Cota de la Universidad Mayor de San Andrés, en donde se procedió a realizar los siguientes pasos sistemáticos:

6.1.2.4.1. Preparación e instalación de las marcas de control.

6.1.2.4.1.1. Selección del sitio de instalación.

En primer lugar para poder enfocar la cámara al infinito fue necesario seleccionar un objeto que tenga las dimensiones necesarias y que esté compuesto de diferentes planos geométricos perspectivas a diferentes profundidades (ya que en este caso no es posible tomar fotografías desde diferentes posiciones) fáciles de identificar en la imagen fotográfica sobre la cual se llevará a cabo la calibración. Los edificios de Geología y Geografía de la facultad de ciencias Geológicas de la UMSA (Figura 73) presentan una disposición en "L" (visto en planta), el cual es ideal para proceder a la instalación de las marcas de control.



Figura 73: Fotografía frontal del edificio Geología-Geografía de la UMSA en el campus de Cota Cota fotografía tomada con focal de 50 mm.

6.1.2.4.1.2. Marcas de control.

Para realizar la calibración del objetivo de la cámara fue necesario tener una malla de marcas bien distribuida, instaladas físicamente sobre los diferentes planos de profundidad del objeto a ser fotografiado en este caso dos edificios, donde la cantidad mínima de marcas para resolver las ecuaciones de coplanaridad y colinealidad es de 6 según Von Grüber, para nuestra calibración se utilizó una cantidad total de 45 marcas, para minimizar de este modo los posibles errores tanto en la medición de las marcas como en su localización sobre las fotografías.



Figura 74: Fotografía de la Placa de medición RS50 vista de frente.

Las marcas seleccionadas son las Placas de medición RS50 de Leica (Figura 74), por las siguientes características:

- Rápido posicionamiento con todos los aparatos de medición convencionales.
- Punto de mira de reflejo de 40 mm,
- Alcance de 10 a 100 m
- Resistente a la temperatura y a los rayos UV
- Óptimo para fijar alturas y ejes
- Para la medición topográfica y la observación de fachadas

De las 45 marcas que se disponen, 24 marcas fueron pre-instaladas sobre un pequeño brazo metálico de 15 cm de largo x 2 cm de ancho con 6 orificios para graduar la posición de la marca (Figura 75), así mismo el extremo cuenta con un recodo metálico con el fin de instalarla bajo los bordes de las vigas de las fachadas de los edificios.



Figura 75: Fotografía de la Placa RS50 pre-instalada sobre una vara de metal con un recodo en el extremo inferior.

6.1.2.4.1.3. Instalación de las marcas de control.

Se determinó que las marcas debieran estar bien distribuidas y a diferentes distancias hacia el objetivo con el fin de formar diferentes planos de profundidad por lo tanto, se procedió a instalar una malla compuesta por 45 marcas (distribuidas más en sentido horizontal que vertical debido a que el formato de la fotografía es rectangular). Fueron instaladas 21 marcas sobre las paredes y 24 marcas (pre-instaladas) colocadas bajo las vigas al borde de la fachada en la planta baja, primer piso y segundo piso de los edificios de Geología y Geografía.

6.1.2.4.2. Medición de los puntos de control.

Para determinar precisamente las coordenadas en XYZ de las marcas instaladas, se procedió a la utilización y estacionamiento de la estación total Kolida KTS-585R (Figura 76), la cual posee una precisión milimétrica necesaria para la calibración del objetivo de nuestra cámara. El instrumento determinara la ubicación de la marca en el espacio mediante el método de radiación, el cual se basa en la dirección y la distancia a la que se encuentra la marca con respecto al punto desde donde realizamos la medición.



Figura 76: Imagen de la estación total Kolida KTS-585R

El instrumento se estacionó frente a los bloques de geología-geografía, para la base topográfica se introdujeron las coordenadas XYZ según las coordenadas de origen igual a cero. El origen en azimut de la base topográfica fue posicionado en cero grados en función a la primera marca, las mediciones fueron realizadas a partir de esta dirección y en sentido horario; y como complemento para tener mayor precisión se realizó la medición tradicional en topografía denominada "doble compensación", en la cual se realiza una segunda medición de la marca, realizando un giro de 180° tanto para el eje vertical como para el eje horizontal en todas las marcas.

Debido a que la focal no cubría una perspectiva amplia, este objetivo fue descartado para su uso en el estudio.

6.1.2.5. Calibración del objetivo con focal de 20 mm al infinito.

Luego de probar con diferentes focales y técnicas se vio por conveniente (ver sección 5.1.3) cambiar el objetivo a una con distancia focal de 20 mm y realizar la calibración de este objetivo en un laboratorio especializado, por lo tanto en el marco del proyecto "GREAT ICE" y de las becas BEST (Bourse d'Echanges Scientifiques et Techniques) financiada por el IRD, la calibración fue realizada por el doctor Álvaro Soruco (Director de Tesis del presente estudio) en el salón Ecrins del laboratorio IRSTEA en la ciudad de Grenoble, Francia .



Figura 77: Fotografía del salón Ecrins del laboratorio IRSTEA en Francia, con las marcas topográficas instaladas (Soruco)

En donde se instalaron 48 marcas de control bien distribuidas en todo el marco de la fotografía (Figura 77), posteriormente se procedió a tomar las coordenadas de cada una de las marcas con una estación total LEICA TS2 donde las mediciones fueron hechas siguiendo la técnica de la "doble compensación" obteniendo una óptima precisión en: X: - 0,0005268 , Y: 0,0002468 , Z: - 0.0005906

El procesamiento de la calibración fue realizado por el programa PoivreF³⁶ desarrollado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN, similar al Instituto Geográfico Militar en Bolivia) del gobierno de Francia.

Los resultados de calibración de la Cámara Canon EOS 5D MarkII con el objetivo Canon EF 20mm fueron presentados en un reporte inédito presentado por el Dr. Soruco cuyos principales resultados son presentados a continuación:

Punto Principal: $X_o = 0.1183084968$ mm
 $Y_o = 0.0368912765$ mm

Coeficientes de la distorsión de la cámara: $K1 = -1.95003613584e -04$
 $K2 = 3.93120978496e -07$
 $K3 = -1.61030469809e -10$

³⁶ Desarrollado para poder realizar mediciones en coordenadas imagen (píxeles) de un determinado par estereoscópico

6.1.3. Establecimiento de una red de marcas de control sobre el Glaciar de Charquini Sur.

El establecimiento de una red de marcas o puntos de control es un paso importante en cualquier trabajo fotogramétrico. Los puntos de control son utilizados para llevar a cabo la orientación de cualquier par estereoscópico. Los puntos o marcas de control deben tener una precisión inferior al tamaño de pixel promedio en las fotografías y deben ser reconocibles en el par estereoscópico.

6.1.3.1. Diseño de las marcas de control.

El glaciar Charquini Sur cuenta con un área menor a 0.5 Km² con una longitud aproximada transversal de 0.7 Km y longitudinal de 0.4 Km, para lo cual se utilizaron tres tipos de marcas de control descritas a continuación:

- Las primeras marcas fueron llamadas tipo "MT", fueron hechas con una tabla de trupan con 0.6 x 0.4 metros de dimensión, pintadas de color negro con una mira de color roja para que exista contraste con el color de la nieve (Figura 78), estas marcas están sujetas a una barra de metal tipo T de 1.2 metros de longitud para ser clavadas sobre la superficie del glaciar. Estas marcas fueron evaluadas en campo y se concluyó se tenía un problema de escala ya que a distancias mayores a los 0.7 km estas marcas eran difíciles de ser identificadas.



Figura 78: Fotografía de la marca tipo MT tomada antes de su instalación en el glaciar.

- Se construyó un segundo tipo de marcas de control de mayor tamaño llamadas tipo "ML" para evitar el problema de la escala, hechas de una tabla de madera trupan sujeta con tornillos en un marco de metal L de 1.23 m x 0.92 m (Figura

79), la madera fue pintada de color celeste y el marco de color negro, los colores fueron seleccionados para que contraste tanto con el hielo, la nieve y la roca, sin embargo luego de un periodo de tiempo desde su instalación se encontró que algunas de las marcas estaban cubiertas por nieve por lo que se vio por conveniente implementar otro tipo de marcas más sencillas pero igual de importantes.



Figura 79: Fotografía de la marca ML3 instalada sobre roca, tomada luego de la primera nevada donde la superficie presenta una ligera cobertura de nieve.

- Se implementó la marca tipo "MX" la cual consiste en pintar sobre roca, se escogió el color blanco por su contraste con la roca granítica con la forma de X para ser fácilmente identificado (Figura 80), para tal efecto fue necesario esperar las primeras nevadas de la época de lluvias para que de este modo la nieve pueda cubrir todas las grietas que se encontraban rumbo a la pared Norte del glaciar.



Figura 80: Fotografía de la marca MX2 pintada sobre granito ubicado al borde del glaciar sobre una grieta que se encontraba parcialmente cubierta por nieve.

6.1.3.2. Instalación de las marcas de control.

Se instalaron seis marcas de tipo "ML" alrededor de los márgenes Sur y Oeste del glaciar ya que son las más grandes por lo que son mejor observadas desde largas distancias, se utilizó como apoyo rocas que fueron apiladas y unidas con una mezcla de cemento para que estén fijas. No se tuvo problema alguno al identificar las marcas en las fotografías terrestres, instaladas sobre una pendiente inferior a los 15°, pero las marcas instaladas sobre paredes escarpadas con pendientes mayores a los 60° fueron cubiertas de nieve a consecuencia de algunas nevadas a un par de meses luego de su instalación, quedando las marcas ML1, ML2 y ML3 que ocupan el margen Sur del Glaciar (Figura 81).

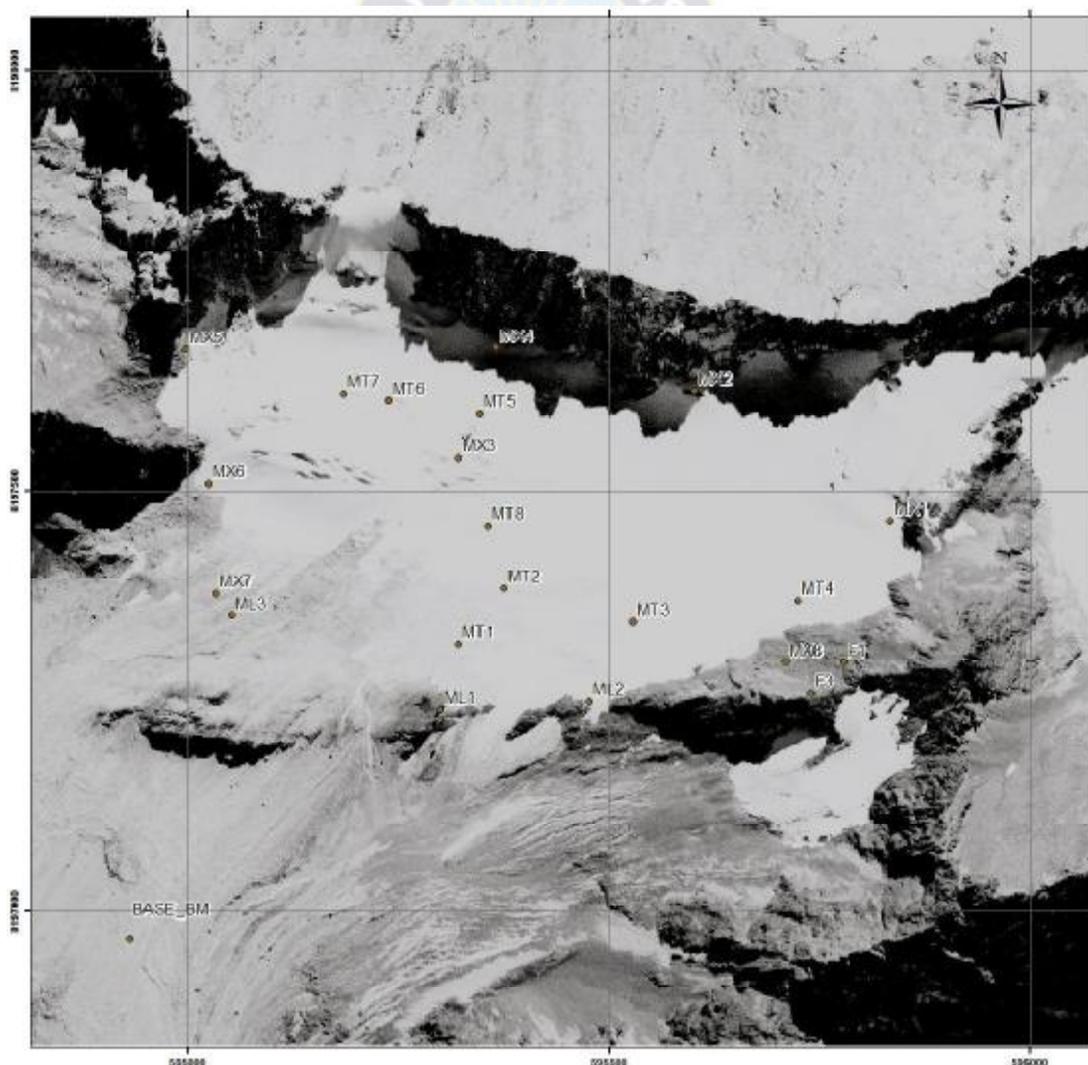


Figura 81: Fotografía aérea del 2006 ortorectificada del glaciar Charquini Sur con las correspondientes marcas de control tipo ML, MT y MX instaladas para la toma de fotografías 2013.

Las marcas tipo MT por ser compactas, fáciles de transportar y sencillas de instalar sobre la nieve fueron distribuidas sobre la superficie glaciar que se encontraba cubierta de nieve (8 marcas en total), las marcas MT1, MT2, MT3, MT7 y MT8 fueron situadas al lado de balizas de control que son medidas mensualmente por el proyecto *GREAT ICE*. La instalación de las marcas de este tipo fue temporal ya que luego de tomar las fotografías se procedió a retirarlas para no alterar las condiciones de albedo³⁷ del glaciar.

Las marcas tipo MX fueron pintadas de color blanco sobre el sustrato rocoso granítico se escogió ese color para que esta resalte del color de la roca que es de una coloración pardo a gris, las marcas están hechas por dos líneas cruzadas de forma X con una longitud promedio de cada línea de 1.5 metros y 0.2 metros de grosor, estas marcas están ubicadas en borde superior del glaciar (Figura 81).

6.1.3.3. Medición de las coordenadas de las marcas o puntos de control.

Como se muestra en la Figura 81, la red de marcas de control tipo ML, MT, MX fueron distribuidas sobre la superficie y margen del glaciar, donde por medio de un GPS diferencial de doble frecuencia se determinó la posición en XYZ de todas y cada una de las marcas.



Figura 82: GPS diferencial base estacionado sobre el punto BM1.

³⁷ Es el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma.

El funcionamiento del GPS diferencial consiste en la lectura de dos estaciones simultáneamente, una estación corresponde a la estación base (Figura 82) y otra corresponde a la estación móvil (Figura 84) que se posiciona en un sitio del cual se desea obtener sus coordenadas de manera precisa.

El sistema GPS consiste en una red de 24 satélites que orbitan al rededor del planeta, la señal enviada corresponde a ondas electromagnéticas con una frecuencia en L1 de 410 Mhz y en L2 de 470 Mhz, que viajan a la velocidad de la luz. Esta señal es recepcionada por ambas estaciones GPS, y debido a que la señal viaja una distancia aproximada de 800km entre las orbitas satelitales y la superficie terrestre, la señal llega con un retardo. Este retardo entre la señal enviada por los satélites y recepcionada por los receptores GPS ocasionan que exista un error en las coordenadas de posicionamiento (lo cual sucede con los GPS convencionales o navegadores). En este sentido, el sistema diferencial adiciona un punto fijo sobre la superficie terrestre (Estación Base) el cual debe ser posicionado en algún punto de control de 1er orden de la red geodésica nacional, desarrollada por el Instituto Geográfico Militar, o en algún punto derivado de esta red geodésica. En gabinete donde se realiza el procesamiento de los datos adquiridos. Mediante este procesamiento y al conocer las coordenadas de un punto fijo sobre la superficie terrestre, se realizan ecuaciones diferenciales con las señales recepcionadas entre ambas estaciones GPS. Esta operación es llevada a cabo de manera semiautomática, y en nuestro caso, hemos utilizado el programa Topcon Tools v8, para el ajuste de todas las coordenadas de nuestras marcas.



Figura 83: Punto base BM1 donde fue instalado el GPS diferencial estación base.

La estación base fue estacionada sobre un punto base llamado BM1 perteneciente a la poligonal de apoyo del glaciar Charquini Sur este punto se encuentra fijo, gracias a un

tornillo fijo sobre granito cercano al pluviómetro BM 01 (Figura 83) con las coordenadas (UTM WGS84) 594930.018 Este y 8196966.882 Norte y 4951.558 m de altura.

El GPS móvil (Figura 84), es el que determina la posición con de las coordenadas XYZ de todas las marcas de control posicionadas.



Figura 84: Fotografía de la marca MX1 y el GPS móvil tomando las coordenadas XYZ de posición.

Las mediciones con el GPS móvil, requieren de un determinado tiempo para lograr obtener una medida precisa del punto de interés en base a la información de los satélites. Para alcanzar una óptima precisión se realizaron lecturas de 20 a 30 minutos para cada localización, obteniéndose la posición exacta de todas las marcas.

La información de posición de las marcas fue procesada en el programa Topcon Tools v8, para el ajuste de coordenadas tomando como punto de referencia el punto base BM (Figura 85), obteniendo de esta manera un margen de error promedio de 0.015 m en coordenadas UTM WGS84.

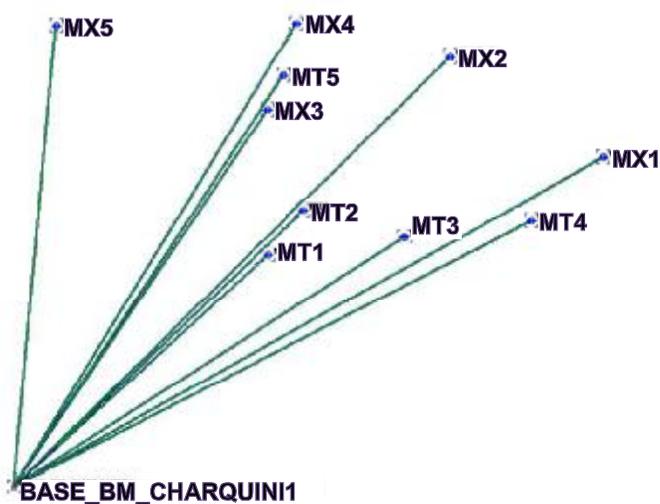


Figura 85: Diagrama generado por el programa Topcon Tools V8 para ajustar las coordenadas de las marcas MX y MT en tomando como referencia al punto Base BM.

Las coordenadas en XYZ ajustadas son:

Marca	X	Y	Z+Am
MT1	595321,192	8197318,636	5094,404
MT2	595375,174	8197384,274	5121,600
MT3	595528,378	8197344,548	5164,777
MT4	595724,254	8197369,233	5222,813
MT5	595345,965	8197591,857	5160,556
MT6	595237,932	8197607,371	5150,187
MT7	595184,760	8197615,423	5145,351
MT8	595355,739	8197458,390	5140,751
MX1	595833,739	8197464,165	5283,771
MX2	595601,093	8197618,555	5273,622
MX3	595321,102	8197539,694	5149,524
MX4	595365,655	8197670,519	5197,199
MX5	594996,416	8197668,121	5180,518
MX6	595024,093	8197509,473	5078,377
MX7	595032,115	8197378,487	5026,041
MX8	595709,656	8197296,839	5219,597
ML1	595300,016	8197239,275	5086,066
ML2	595476,858	8197249,081	5121,676
ML3	595052,006	8197352,020	5024,705
BASE_BM	594930,018	8196966,882	4951,558

Tabla 20: Coordenadas x, y, z de la antena de las marcas de control instaladas sobre el glaciar Charquini Sur en WGS84 (donde Am representa la altura de la antena).

6.1.4. Elección del objetivo para la cámara.

Las marcas de control de tipo MT fueron instaladas en el glaciar a diferentes distancias dentro del perímetro con el fin de evaluarlas en las fotografías, las tomas fueron obtenidas con el objetivo de 50 mm y otra de 15 mm.

Se concluyó que las fotografías tomadas con el objetivo de 15 mm, cubre todo el glaciar, se logra advertir las marcas más cercanas sin problemas de visibilidad sin embargo las marcas más distantes tendían a confundirse con la nieve, esta focal presenta mucha deformación en la geometría del lente.

Las fotografías tomadas con el objetivo de 50 mm, cubrían pequeñas áreas por lo que era necesario unir 5 fotografías en un mosaico para obtener toda la cobertura glaciar o generar 5 pares estereoscópicos, las marcas cercanas y lejanas eran visibles, y el objetivo presentaba poca deformación.

Las fotografías tomadas con el objetivo de 20 mm cubrían el 80% de todo el glaciar, por lo tanto fue necesario solo 2 pares estereoscópicos para cubrir todo el glaciar, en donde todas las marcas son perfectamente reconocibles.

Característica	15 mm	50 mm	20 mm
Recubrimiento del Glaciar	Completo (100%)	Incompleto (30%)	Incompleto (80%)
Deformación	Mucha	Poca	Moderada
Visión de marcas a distancia	Poco Visibles	Visibles	Visibles

Tabla 21: Síntesis de comparación de las características de las focales.

Obtenidos estos resultados se decidió utilizar un objetivo de 20 mm por su moderada deformación y buena cobertura para las tomas del glaciar.

6.1.5. Ubicación del sitio de la toma.

Para adquisición fotográfica fue necesario encontrar el sitio adecuado, para lo cual se consideraron ambos flancos del glaciar (Figura 86); las fotografías tomadas desde el flanco Oeste revelaron que no se lograba observar la parte Nor-Este del glaciar debido a una cresta formada por la acumulación de nieve que lo cubría, por lo cual fue descartado. Las fotografías tomadas desde el flanco Este no mostraban mayor problema de cobertura por lo que se decidió realizar las tomas desde este flanco.

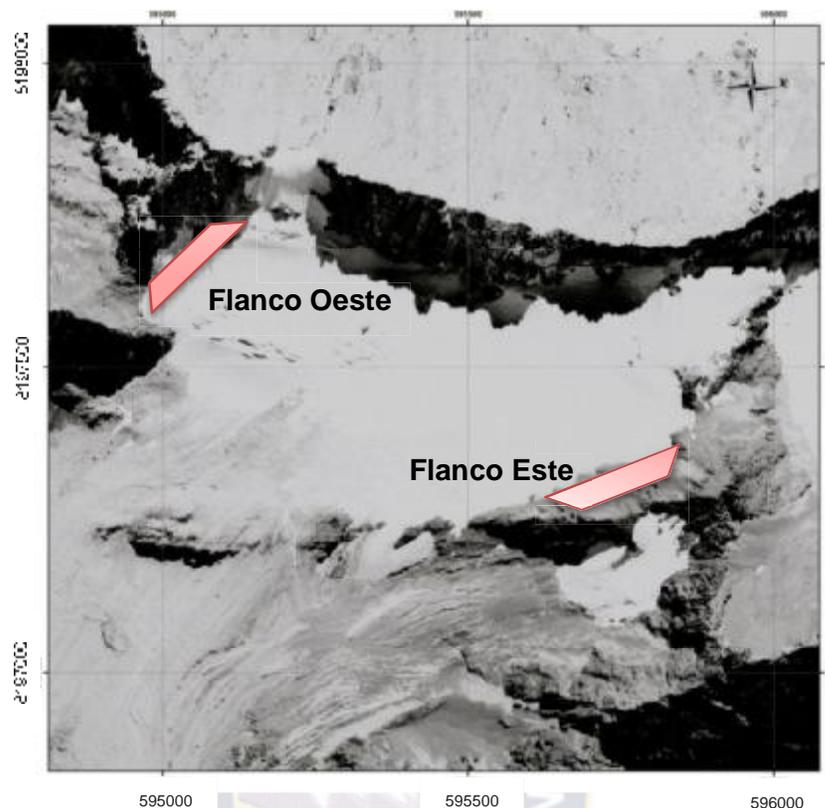


Figura 86: Fotografía aérea con los flancos Oeste y Este del glaciar Charquini Sur para la adquisición fotográfica para el año 2013.

6.2. Adquisición fotográfica terrestre.

6.2.1. Toma de las fotografías.

La toma de las fotografías fue llevada a cabo el día viernes 26 de Julio del año 2013, día donde las primeras tomas fueron obtenidas en la posición BF1, las segundas en la posición BF2 y las terceras en BF3, las imágenes fueron obtenidas con la cámara semi-métrica ya calibrada Canon EOS 5D Mark II con el objetivo EF 20mm. Se obtuvo un total de 15 fotografías, 5 fotografías por cada punto (Tabla 22).

Punto de toma	No de Foto
BF1	266-267-268-269-270
BF2	271-272-273-274-275
BF3	278-279-280-281-282

Tabla 22: Lista de las fotografías tomadas en cada base fotográfica tomadas el año 2013.

6.2.2. Toma topográfica de coordenadas de las bases.

Al igual que en las mediciones de coordenadas tomadas para las marcas de control, se utilizó la misma base para el GPS diferencial para luego lograr adquirir las

coordenadas de las diferentes bases fotográficas BF1, BF2 y BF3 que fueron medidas sobre la superficie rocosa con la estación móvil del GPS diferencial (Figura 87), desde donde se tomaron las fotografías terrestres. La diferencia longitudinal entre la primera y la tercera base fotográfica corresponde a 54,455 metros con una variación altitudinal de 11,488 m respectivamente (ver 6.4.2.1), lo que constituye la base fotográfica.



Figura 87: Fotografía de la antena del GPS diferencial (estación móvil) sobre el punto BF3.

La Tabla 23, presenta los resultados obtenidos luego de realizar el ajuste de nuestras coordenadas (en el sistema WGS84) en el programa Topcon Tools v8:

Punto	X	Y	Z
BF1	595779,057	8197296,416	5256,663
BF2	595767,058	8197280,606	5254,713
BF3	595739,657	8197258,827	5245,175
BASE_BM	594930,018	8196966,882	4951,558

Tabla 23: Coordenadas de las bases fotográficas.

6.2.3. Características de la toma terrestre sobre el glaciar de Charquini Sur Julio de 2013.

La hora de las tomas fue entre las 12:20 y 13:30, momento en el que se tuvieron condiciones ideales y con una hora de diferencia entre la primera y la última toma. Para realizar una óptima restitución fotogramétrica no puede existir mucha variabilidad temporal entre tomas, ni condiciones climáticas adversas (nubes, bruma, etc). En este sentido, la cobertura de nubes fue nula, el viento fue moderado con una dirección hacia el valle, y la superficie del glaciar se encontraba intacta.

La nieve en las fotografías presenta una tonalidad clara y homogénea con contraste moderado, debido a precipitaciones caídas hasta el mes de julio del año 2013, mes en el cual se tuvieron importantes precipitaciones provocando que la nieve acumulada no llegue a fundirse por completo.



Figura 88: Fotomosaico de las fotografías terrestre 271 – 272 tomadas desde la posición BF2 del glaciar Charquini Sur con los puntos de control y coordenadas.

Las fotografías 271 - 272 fueron tomadas desde el punto BF2 donde la fotografía 271 corresponde a la parte superior y la fotografía 272 a la parte inferior del glaciar, la Figura 88 es un fotomosaico generado mediante la herramienta "photomerge" del programa Adobe Photoshop CS5 que aplicando algoritmos y basándose en pixeles similares en ambas fotografías logro unir las sin deformarlas en el proceso con el fin de generar un mosaico para poder identificar todas las marcas de control.

6.3. Preparación.

6.3.1. Selección de pares estereoscópicos.

Para lograr cubrir toda la superficie del glaciar se trabajó con dos pares estereoscópicos. Cada par tuvo que ser preparado considerando que las fotografías correspondan al mismo sector de enfoque (parte alta o parte baja) del glaciar pero desde distintas posiciones, también las imágenes debían contener al menos siete marcas de control homologas para el par estereoscópico, es decir siete marcas visibles en ambas fotografías.

El primer par fotogramétrico abarca la zona media e inferior del glaciar, está constituido por la fotografía número 267 correspondiente al punto BF1 y la fotografía número 282 correspondiente al punto BF3 (Figura 89), estas fotografías tienen un recubrimiento aproximado al 80% entre sí.

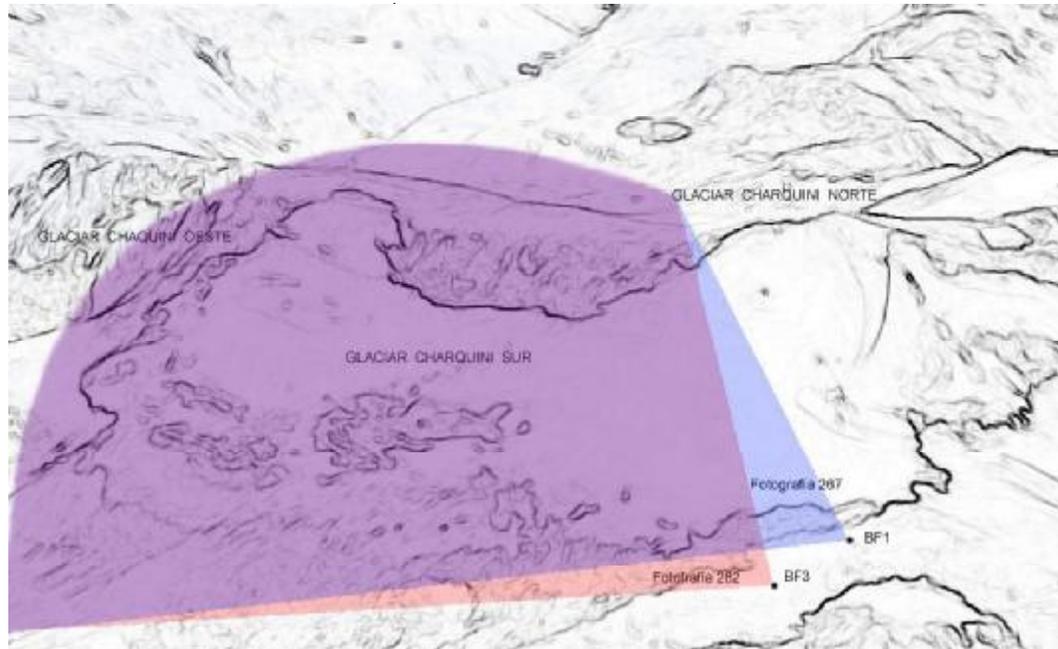


Figura 89: Esquema de la disposición del primer par estereoscópico de la parte inferior del glaciar.

El segundo par estereoscópico abarca la zona media y superior del glaciar está constituido por la fotografía número 271 correspondiente al punto BF2 y la fotografía 281 correspondiente al punto BF3 (Figura 90), con un recubrimiento cercano al 80%.

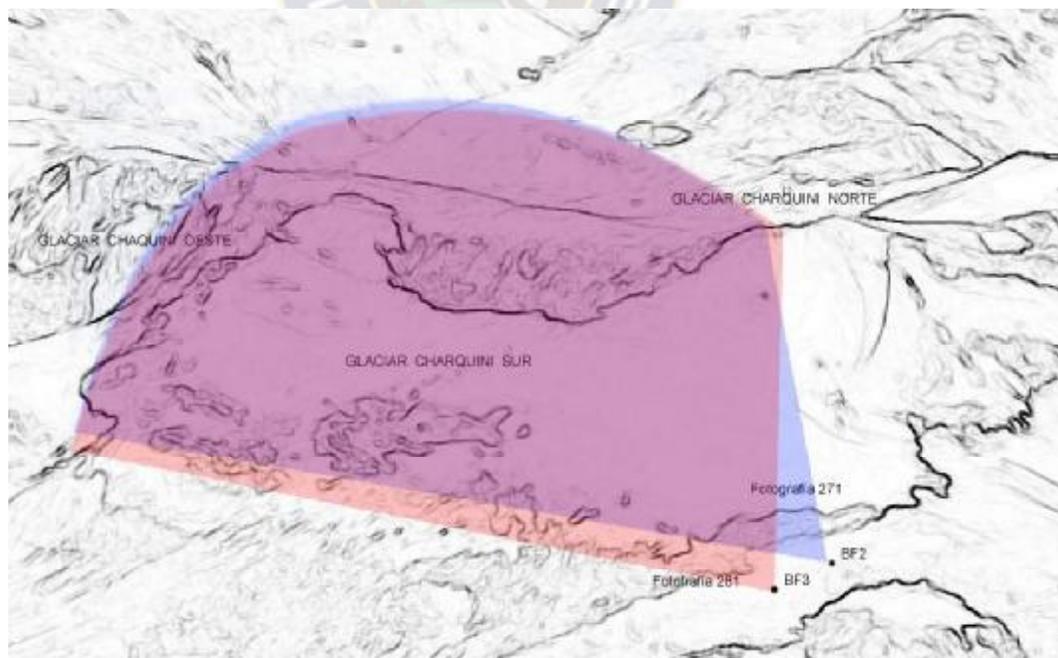


Figura 90: Esquema de la disposición del segundo par estereoscópico de la parte superior del glaciar.

6.3.2. Preparación de pares estereoscópicos.

Las imágenes fotográficas generadas por la cámara Canon EOS 5D Mark II están en formato *.RA2 (más un formato comprimido JPEG) el cual es un archivo de imagen digital que guarda toda la información que el sensor de la cámara digital capturó al momento de la toma, este formato no sufre pérdida de información por la compresión y tampoco se modifica por el procesamiento que el instrumento pueda provocar. Este archivo permite tener el equivalente a un negativo digital. De esta manera es posible procesar la imagen a criterio, de forma precisa, creativa y múltiple, sin alterar el archivo original.

Las fotografías fueron preparadas con la herramienta *Camera Raw 6.0* perteneciente al programa adobe Photoshop CS5 para tener colores más claros y buen contraste, donde los 3 canales RGB que forman el espacio de color de la imagen fueron interpolados con los siguientes ajustes:

Equilibrio de blancos	Luz de día
Luz de relleno	+60
Brillo	+60
Contraste	-10
Claridad	+40

Tabla 24: Síntesis de las características técnicas de las fotografías tomadas el 2013.

A partir de los ajuste (Tabla 22) se generaron nuevos archivos de imagen de los pares estereoscópicos en formato TIFF (Figura 91) sin ninguna pérdida de información, para que el programa Erdas pueda realizar la orientación interna y externa.



Figura 91: Fotografías 267 y 282 respectivamente correspondientes al primer par estereoscópico de la parte media y baja del glaciar Charquini Sur, con los ajustes aplicados.

6.3.3. Identificación de los puntos de control.

Los puntos de control también llamados puntos de paso, son aquellos puntos de conexión entre las imágenes fotográficas pertenecientes al par estereoscópico, con coordenadas conocidas en un sistema de coordenadas de referencia. Donde la cantidad mínima necesaria es según Von Grüber es de seis puntos. Sin embargo, redes de puntos de control mucho más densas permiten obtener resultados más precisos durante los cálculos iterativos en la triangulación. De esta manera, cada modelo estereoscópico deberá ser obtenido con una configuración mucho más densa mediante la generación y uso de TIE points.

En el primer par se encontraron los siguientes puntos homólogos: MT1, MT2, MT3, MT5, MT6, MT7, MX2, MX3, MX4, MX5, MX6, MX7, ML3.

En el segundo par se encontraron los siguientes puntos homólogos MT4, MT5, MT6, MX1, MX2, MX3, MX4.

6.4. Triangulación.

6.4.1. Orientación interna.

La orientación interna para las fotografías terrestres del 2013 fue realizada en el programa LPS suite complemento del programa ERDAS. La orientación interna consiste en determinar la geométrica de las fotografías utilizadas. Para tal efecto, se introducen los principales parámetros del objetivo con distancia focal 20mm (véase 6.1.2.5) que describen la geométrica de las imágenes, que son:

- Tamaño de pixel = 6.4103 μm
- Distancia focal = 20.124 mm
- Coeficientes de la distorsión de la cámara: K1= -1.95003613584e-04
K2= 3.93120978496e-07
K3= -1.61030469809e-10

Todos estos parámetros fueron obtenidos mediante el proceso de calibración (véase 6.1.2.5), del instrumento utilizado para la adquisición fotográfica.

6.4.2. Orientación Externa.

Esta etapa fue realizada sobre fotografías adquiridas de manera terrestre el año 2013 aplicando fotogrametría terrestre. Lastimosamente al no contar con un programa

especializado y dedicado a este tipo de condiciones (fotografías terrestres) se procedió a transformar las coordenadas originales de la fotografía a coordenadas auxiliares que para este trabajo se denominaron como "Orima" con el fin de simular que las fotografías fueron tomadas como fotografías aéreas.

A continuación se desarrolla la transformación del sistema de coordenadas de los puntos de control previamente medidos con un GPS diferencial (en coordenadas UTM WGS84 zona 19S) al sistema de coordenadas auxiliar Orima, para de esta manera poder trabajar con el programa LPS y proseguir con el proyecto fotogramétrico.

6.4.2.1. Cálculo de los ángulos de rotación.

Primeramente se necesitó un punto de origen donde colocar el sistema cartesiano con los ejes XYZ cuyo origen (o) sea el centro de la nueva proyección para realizar las rotaciones correspondientes, dicho punto fue encontrado en medio de las bases fotográficas BF1 Y BF3; además fue necesario contar con un punto medio ubicado sobre el glaciar hacia el cual se orientara las rotaciones para el sistema de coordenadas auxiliar, para lo cual se seleccionó la marca de control MX3 (Figura 92) que se encuentra pintada en forma de + sobre un bloque de granito que descansa sobre el glaciar.



Figura 92: Fotografía de la marca MX3 pintada en un bloque de granito sobre el glaciar Charquini Sur.

Los puntos BF1 y BF3 (desde donde se tomaron las fotografías) fueron unidos con un segmento (línea color negro, Figura 93) de 54.455 m de longitud sobre el cual se determinó el punto medio (donde se ubicó el origen o del sistema cartesiano), a partir de este punto se trazó una directriz (Zo) hacia las coordenadas de la marca MX3 con una longitud de 510.636 m (línea color verde, Figura 93), una vez realizado este

diagrama se procedió a colocar el origen del sistema cartesiano XYZ sobre el punto medio (o).

Primeramente y con una visión bidimensional en planta sobre los ejes XY, se determinó el primer ángulo de rotación girando sobre el eje Z (Kappa) y transportando el eje Y que se encuentra orientado hacia el Norte hasta la directriz, obteniendo de esta manera un ángulo de 59.121° .

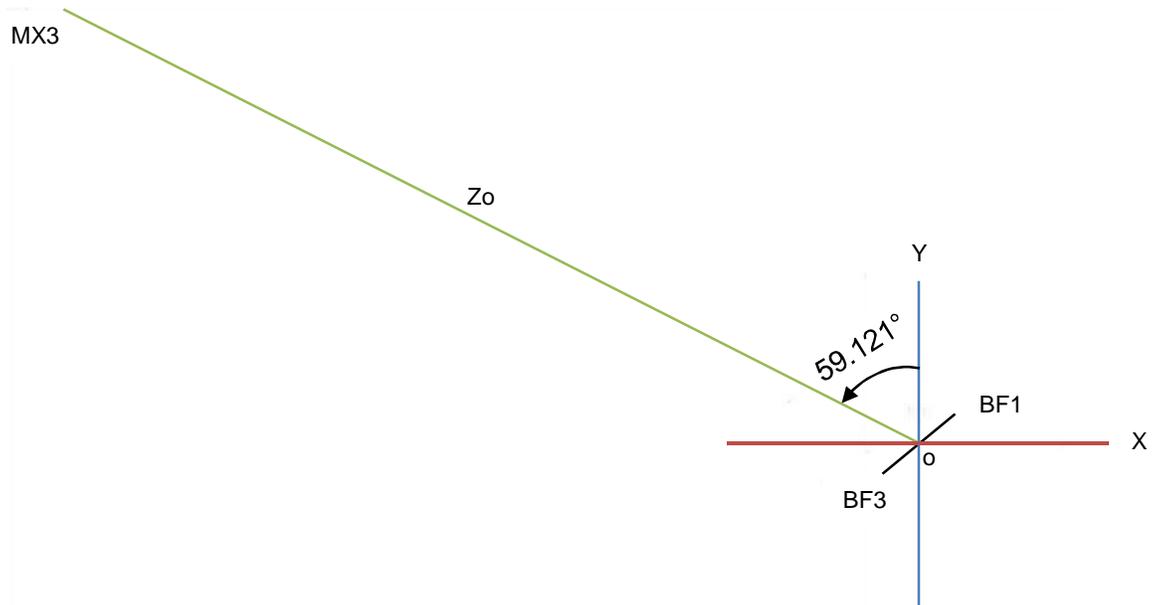


Figura 93: Diagrama de cálculo del ángulo de rotación sobre el eje Z, visto en planta.

Luego se pasó a una visión bidimensional de perfil para los ejes ZY (Figura 94), en esta disposición se rotó el eje Y que se encuentra horizontal hasta encontrar la directriz (Zo) utilizando como eje de rotación el eje X (Omega), logrando de este modo obtener el segundo ángulo de rotación igual a 11.231°

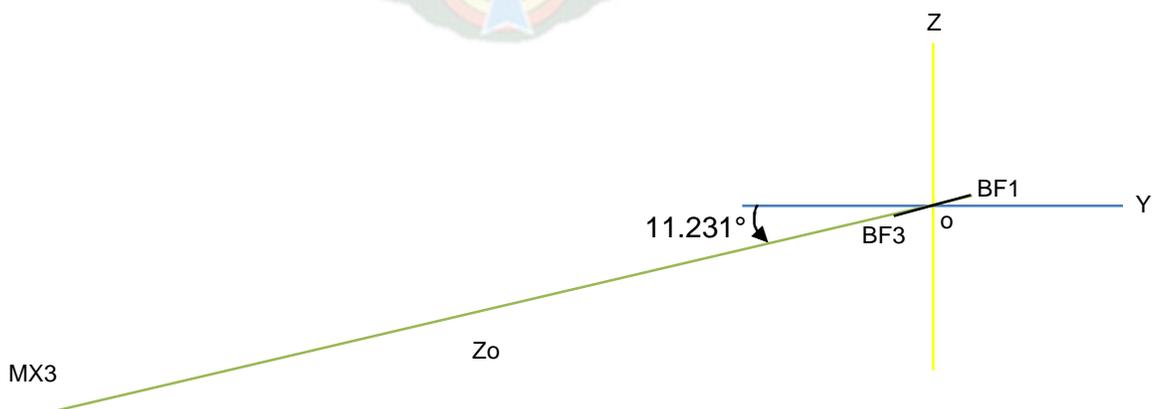


Figura 94: Diagrama de cálculo del ángulo de rotación sobre el eje Z, visto de perfil.

Para comprobar los ángulos obtenidos se procedió a realizar los mismos cálculos utilizando el método diédrico (ampliamente utilizado en geometría descriptiva) que se basa en transportar los puntos a una grilla que representa la altura (Figura 95), obteniéndose los mismos ángulos que son presentado en la tabla 25.

Eje de rotación	Ángulo (sexagesimal)	Ángulo (cegesimal)
Z (Kappa)	59.121°	65.690°
X (Omega)	11.231°	12.479°

Tabla 25: Ángulos de los ejes de rotación calculados.

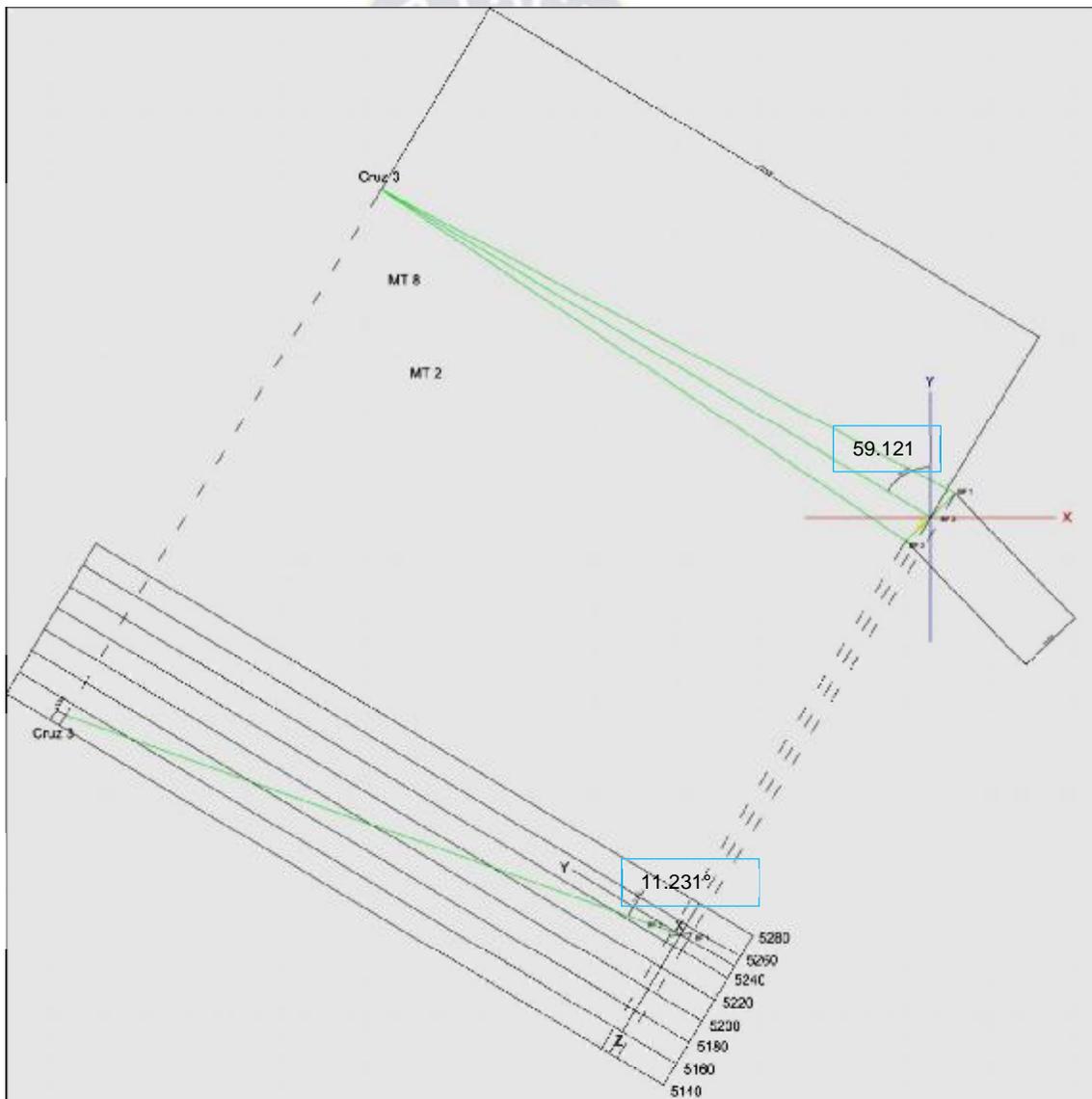


Figura 95: Diagrama del cálculo de los ejes de rotación mediante el método diédrico se ve los puntos en planta y perfil.

Para realizar la transformación del sistema de coordenadas UTM al sistema de coordenadas auxiliar Orima, se necesitó de:

- Una matriz de rotación.
- Un vector de translación.

Las matrices Rx y Rz fueron obtenidas operando el seno de los ángulos de rotación Omega y Kappa con la mediatriz de la base fotogramétrica y el punto MX3.

$$R_x = \begin{vmatrix} 1,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,513 & 0,858 \\ 0,000 & -0,858 & 0,513 \end{vmatrix}$$

$$R_y = \begin{vmatrix} 1,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 1,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 1,000 \end{vmatrix}$$

$$R_z = \begin{vmatrix} 0,981 & 0,195 & 0,000 \\ -0,195 & 0,981 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 1,000 \end{vmatrix}$$

El producto de las matrices $R_x * R_z$ es la matriz de rotación = $\begin{vmatrix} 0,981 & 0,195 & 0,000 \\ -0,100 & 0,503 & 0,858 \\ 0,167 & -0,842 & 0,513 \end{vmatrix}$

La Tabla 26 de coordenadas auxiliares Orima se obtuvo sumando el producto de cada columna de la matriz de rotación (primera fila para X, segunda fila para Y, tercera fila para Z) con las coordenadas XYZ del punto en coordenadas UTM.

Marca	X	Y	Z
MT1	2180472,087	4071381,780	-6798518,808
MT2	2180537,819	4071432,767	-6798551,082
MT3	2180680,352	4071434,512	-6798469,871
MT4	2180877,285	4071477,168	-6798428,123
MT5	2180549,599	4071573,618	-6798710,718
MT6	2180446,657	4071583,327	-6798747,158
MT7	2180396,071	4071588,545	-6798765,306
MT8	2180533,191	4071488,456	-6798606,894
MX1	2181003,162	4071566,330	-6798458,452
MX2	2180805,041	4071658,594	-6798632,517
MX3	2180515,053	4071540,376	-6798676,624
MX4	2180584,233	4071642,697	-6798754,839
MX5	2180221,598	4071664,082	-6798823,103
MX6	2180217,846	4071493,789	-6798737,345
MX7	2180200,203	4071382,132	-6798652,598
MX8	2180848,866	4071439,424	-6798371,271
ML1	2180435,860	4071336,790	-6798459,819
ML2	2180611,225	4071354,612	-6798420,237
ML3	2180214,558	4071365,673	-6798627,679
BF1	2180916,856	4071464,086	-6798340,291
BF2	2180902,007	4071455,653	-6798329,988
BF3	2180870,889	4071439,243	-6798321,130
BASE BM	2180019,894	4071121,211	-6798361,395

Tabla 26: Coordenadas de las marcas de control en coordenadas Orima para el 2013.

Se pudo advertir que las coordenadas obtenidas en la Tabla 26 no eran consistentes ya que se encuentran en otra región, para solucionarlo fue necesario re-calcularlas aplicando el vector de traslación (Tabla 27), este vector fue obtenido realizando una diferencia entre las coordenadas WGS84 y las coordenadas auxiliares Orima sobre un punto arbitrario.

Traslación en X	1585150,895
Traslación en Y	-4125936,856
Traslación en Z	-6803613,212

Tabla 27: Vector de traslación para x, y, z.

6.4.2.2. Transformación de coordenadas UTM a coordenadas auxiliares Orima.

A partir de la matriz de rotación y la aplicación del vector de traslación a la Tabla 26, se encontró las coordenadas de los puntos de control en el nuevo sistema de

coordenadas auxiliar Orima que cual corresponde a la nueva disposición geométrica a partir del centro de proyección (Tabla 28). Estas coordenadas fueron necesarias para realizar la orientación externa.

Marca	X	Y	Z
MT1	595321,192	8197318,636	5094,404
MT2	595386,924	8197369,623	5062,130
MT3	595529,457	8197371,368	5143,341
MT4	595726,390	8197414,024	5185,088
MT5	595398,705	8197510,474	4902,494
MT6	595295,762	8197520,183	4866,054
MT7	595245,176	8197525,401	4847,905
MT8	595382,297	8197425,312	5006,318
MX1	595852,268	8197503,186	5154,760
MX2	595654,147	8197595,451	4980,694
MX3	595364,158	8197477,232	4936,588
MX4	595433,338	8197579,553	4858,372
MX5	595070,703	8197600,938	4790,109
MX6	595066,951	8197430,645	4875,866
MX7	595049,308	8197318,988	4960,613
MX8	595697,972	8197376,280	5241,940
ML1	595284,965	8197273,646	5153,392
ML2	595460,330	8197291,468	5192,974
ML3	595063,663	8197302,530	4985,533
BF1	595765,961	8197400,942	5272,921
BF2	595751,113	8197392,509	5283,223
BF3	595719,995	8197376,099	5292,082
BASE BM	594869,000	8197058,067	5251,817

Tabla 28: Coordenadas de las marcas de control en coordenadas Orima para el 2013.

6.4.2.3. Cálculo de la Orientación Externa.

La orientación externa para los pares fotográficos del año 2013 fue realizada utilizando el mismo procedimiento utilizado para las fotografías aéreas del vuelo del 2006 en el programa LPS.

6.4.2.3.1. Medición de los puntos de enlace.

En esta etapa se realizó la identificación y medición de los puntos de enlace (TIE) tanto en el primer par estereoscópico 267 - 282 (Figura 96) como en el segundo par estereoscópico 271 - 281 utilizando la herramienta *Point Measurement* del LPS, realizando 15 marcas TIE (Cuadrados rojos en la Figura 97) en ambos pares para

posteriormente realizar la medición automática obteniendo en promedio 100 puntos para cada par.



Figura 96: Imagen de la herramienta *Point Measurement* donde se ve ambas fotografías del primer par estereoscópico fotografía 267 y 282, donde se marcaron los tie points (de color verde) para enlazar ambas fotografías.

6.4.2.3.2. Medición de los puntos de Control.

Obtenidas las coordenadas de las marcas de control instaladas en el glaciar en coordenadas Orima (Tabla 28), estas fueron introducidas en el programa ERDAS, las coordenadas fueron correlacionadas con las marcas visibles en las fotografías terrestres con el fin de relacionar las marcas en las fotografías terrestres con los puntos de control en el sistema de coordenadas Orima.

Seguido se llevó a cabo la triangulación con el programa *ORIMA*³⁸ (Orientation Manager), este programa realizó la convergencia de todos los haces de luz de los puntos de enlace y los puntos de control medidos en las fotografías terrestres. La Figura 97 del primer par y la Figura 98 del segundo par, nos presentan el resultado de la triangulación obtenida donde los cuadrados rojos representan los puntos de enlace y los triángulos rojos las marcas de control.

³⁸ Es un complemento del programa LPS utilizado para realizar triangulación.

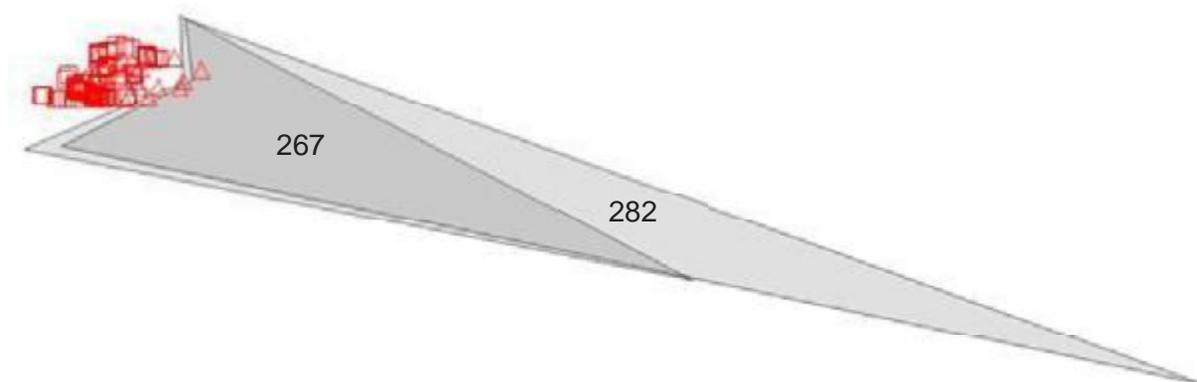


Figura 97: Figura generada por el LPS con los puntos de enlace del primer par estereoscópico triangulado de las fotografías 267 y 282.

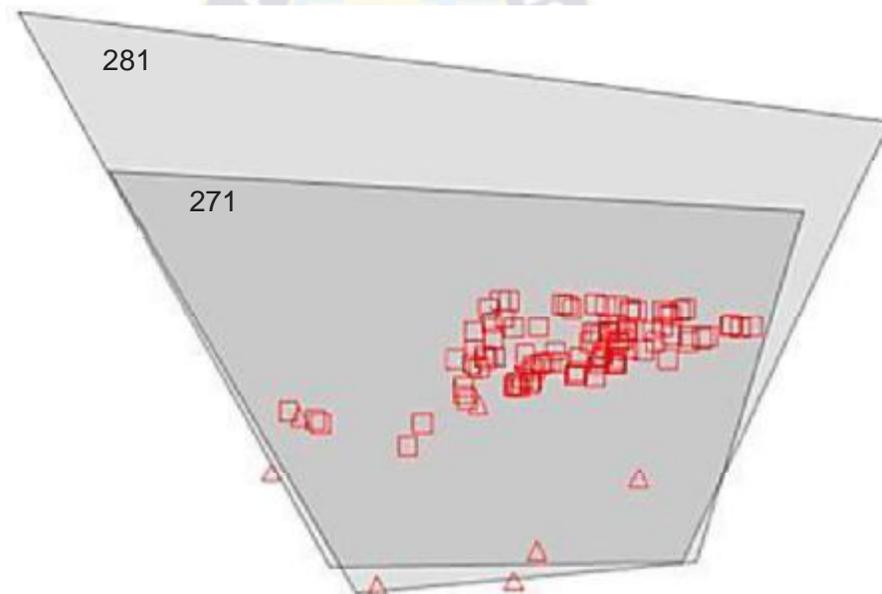


Figura 98: Figura generada por el LPS con los puntos de enlace del segundo par estereoscópico triangulado fotografía 271 y 281.

Seguido, las fotografías fueron introducidas en el programa ArcGis (Figura 99) donde se observa que los dos pares fotogramétricos (fotografías 267- 282 y 271 - 281) del año 2013 se encuentran perfectamente orientadas con dirección SW hacia el punto MX3, hacia donde se realizó la rotación de los ejes (véase 6.4.2.1.), las líneas rojas marcan los márgenes de cada fotografía así mismo se proyectan hacia el sitio desde donde fueron tomadas (Posiciones de las bases fotográficas).

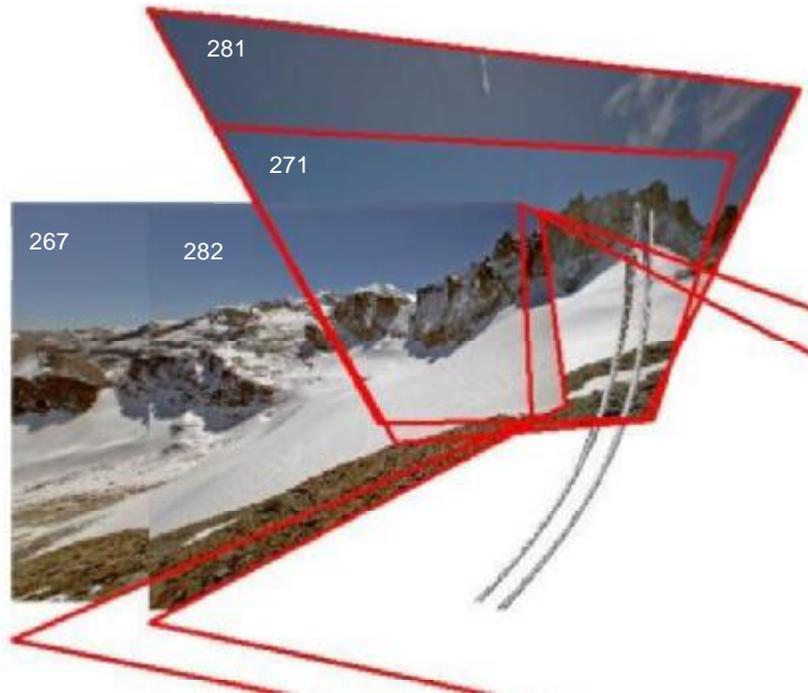


Figura 99: Modelo estereoscópico de los 2 pares estereoscópicos 267 - 282 y 271 - 281 luego de la triangulación visto en ArcGis.

6.4.3. Restitución fotogramétrica.

La restitución fotogramétrica fue realizada en dos etapas:

- Primera etapa para el par estereoscópico 267-282.
- Segunda etapa para el par estereoscópico 271-281.

En ambas etapas fue llevada a cabo la misma metodología utilizada en el par fotogramétrico 144 -145 del año 2006, se generó una malla de puntos restituidos con la ayuda del *Stereo Window* del programa ArcGis.

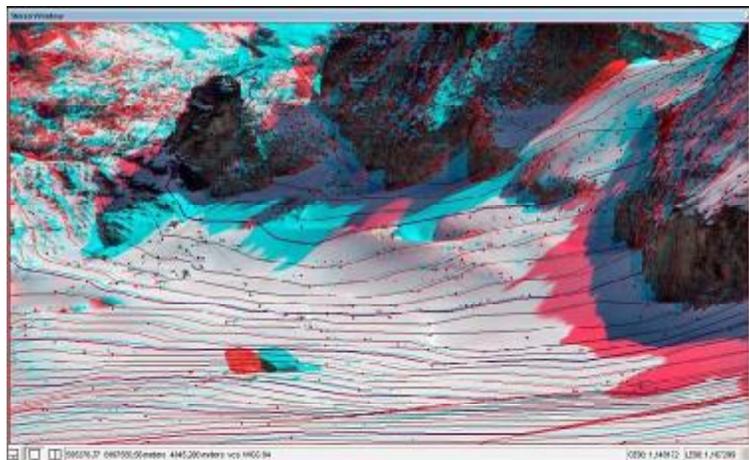


Figura 100: Imagen del Stereo Window en Arcgis, donde se ve la aplicación del Terrain Editor.

Posteriormente la red de puntos restituidos con coordenadas en xyz en el sistema de coordenadas auxiliar Orima fue retrabajada con la ayuda de la extensión *terrain editor* de Arcgis (Figura 100) obteniendo mayor precisión y consistencia en la red de puntos.

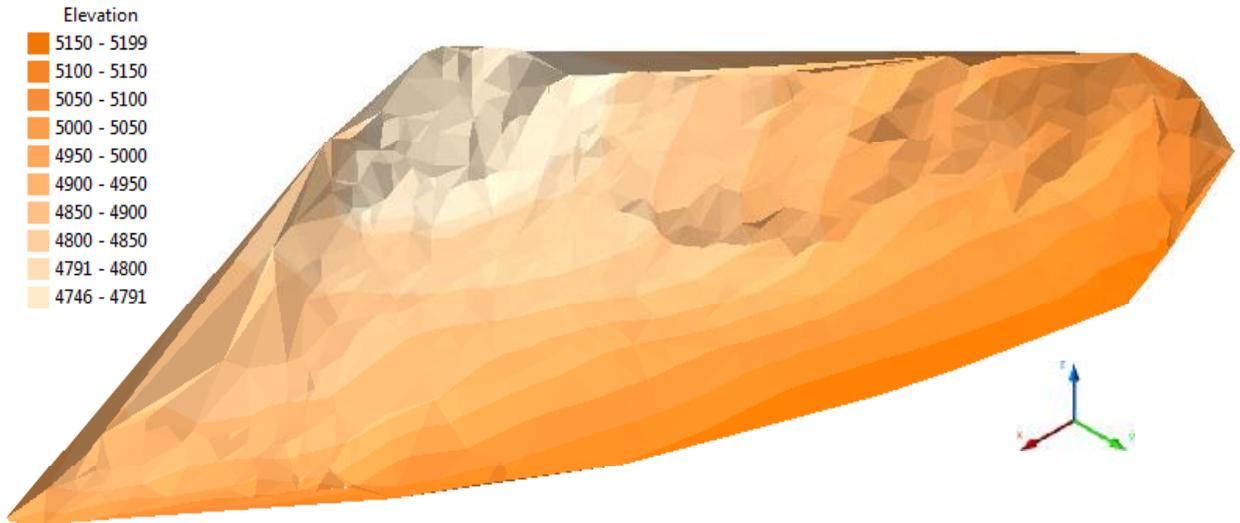


Figura 101: TIN del glaciar Charquini Sur 2013 en coordenadas Orima.

Concluida la corrección de los puntos se generó un TIN (Figura 101) en coordenadas Orima observándose que el modelo no coincidía con el modelo del 2006 además que no estaba correctamente orientado y las alturas no corresponden a alturas altimétricas en Z, por lo tanto se realizó el proceso inverso de transformaron utilizando la matriz de transformación a la inversa a las coordenadas de los puntos restituidos:

$$(rx * xz) *^{-1} = \begin{vmatrix} 0,981 & -0,100 & 0,167 \\ 0,195 & 0,503 & -0,842 \\ 0,000 & 0,858 & 0,513 \end{vmatrix}$$

Las coordenadas de puntos restituidos obtenidas en coordenadas Orima fueron recalcularlas en una hoja de cálculo (Excel), generando una nueva tabla de coordenadas de los puntos restituidos en el sistema UTM - WGS84 en el cual esta nuestro trabajo.

A partir de esta tabla de puntos en coordenadas en UTM - WGS84 se pudo construir el TIN correspondiente al año 2013 (Figura 102) en donde se hizo una diferencia altimétrica por zonas representadas con diferentes tonos de anaranjado.

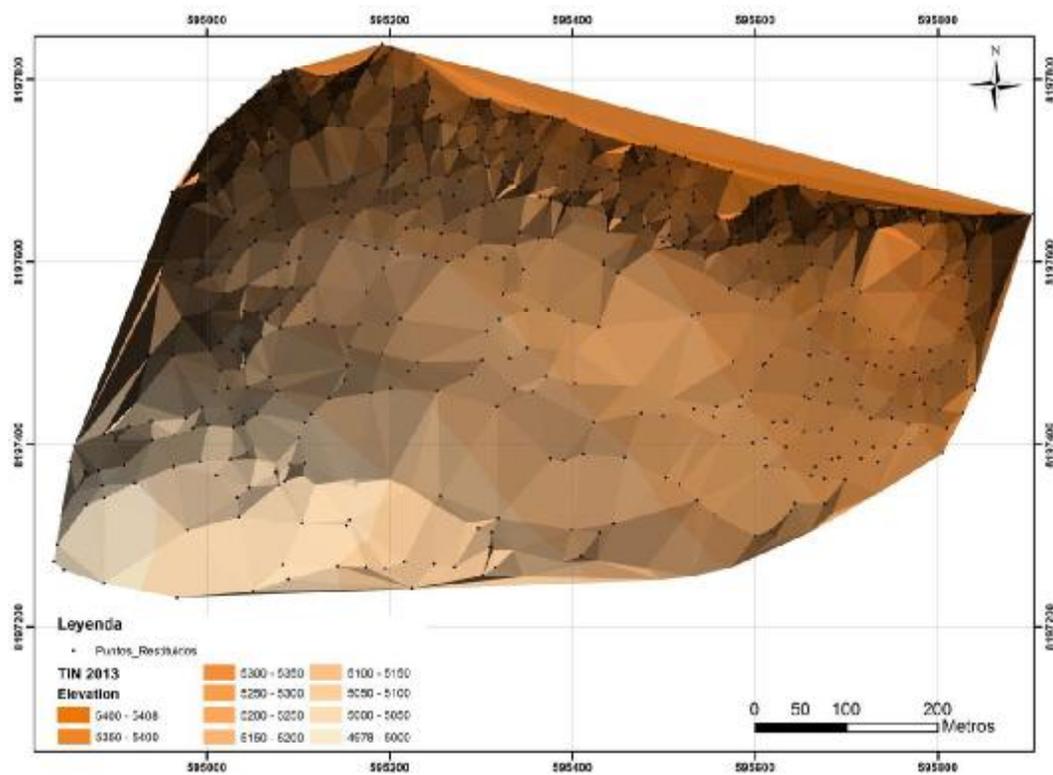


Figura 102: Modelo Dem vector del glaciar Charquini Sur 2013 en coordenadas WGS84.

El TIN correspondiente al año 2013 fue también introducido al subprograma ArcView donde se pudo observar el modelo en 3 dimensiones (Figura 103).

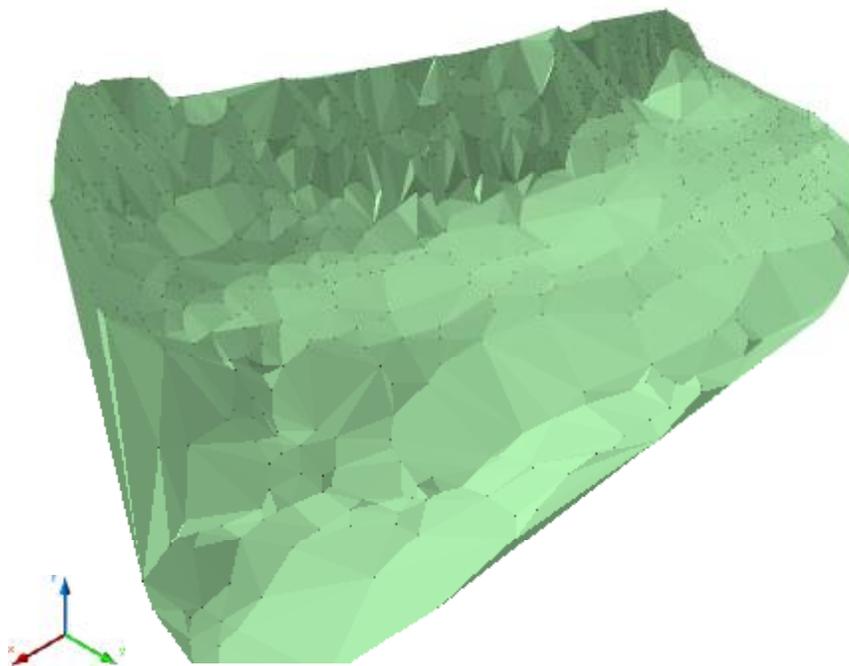


Figura 103: Imagen tridimensional generado del glaciar visto desde el SO.

6.4.4. Construcción del Dem 2013.

El modelo digital de elevación correspondiente al año 2013 fue realizado al igual que el modelo para el año 2006 en el programa SURFER donde se generó un GRID utilizando como método de interpolación el Kriging con un espacio entre vértices de 5 metros, se utilizó los mismos límites utilizados para en Dem del 2006 (Tabla 18) para que de esta manera ambos modelos 2006 y 2013 coincidan para lograr una correcta sustracción.

Las curvas de nivel de la Figura 104 generadas son suaves en la parte central porque corresponden al glaciar sin embargo hacia el borde inferior derecho y margen superior izquierdo se tiene curvas rectas, esto debido a que estas zonas no fueron medidas por lo tanto se encuentran vacías y fueron rellenadas por curvas rectas resultado de la interpolación realizado por el programa en base a los puntos cercanos.

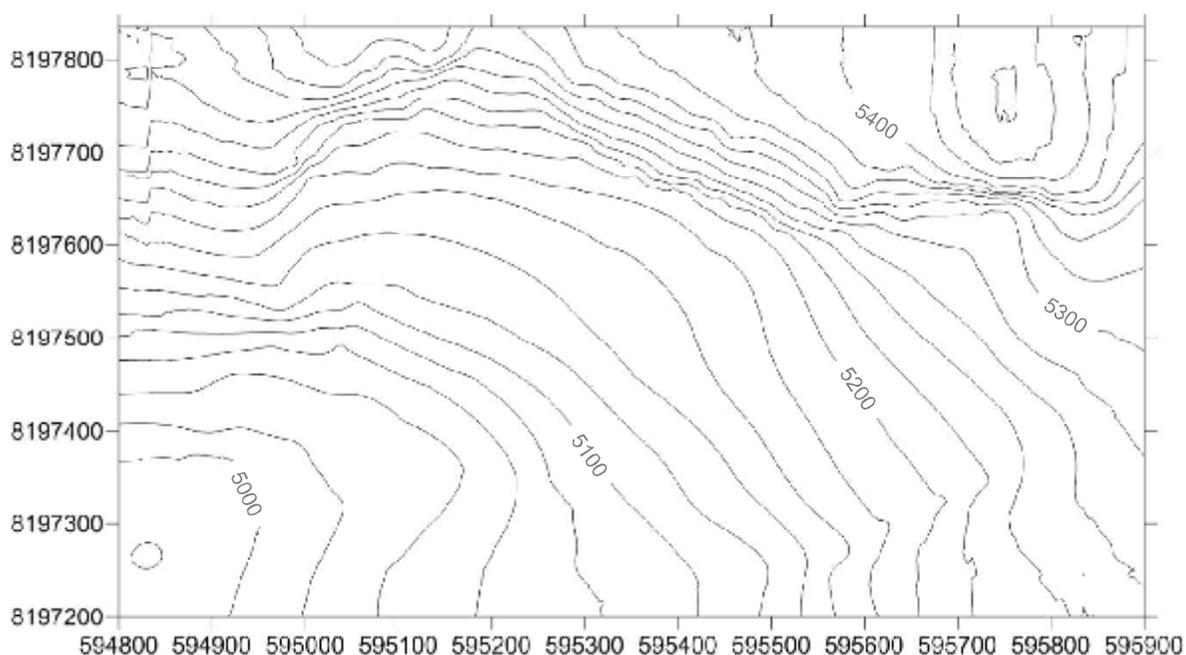


Figura 104: Mapa de curvas de nivel que representan la superficie del glaciar del 2013 realizado por el programa SURFER.

Sobre el Dem 2013 en formato Raster (Figura 105), se observa una superficie interpolada con buen detalle la cual es necesaria para determinar el balance de masa mediante el método volumétrico.

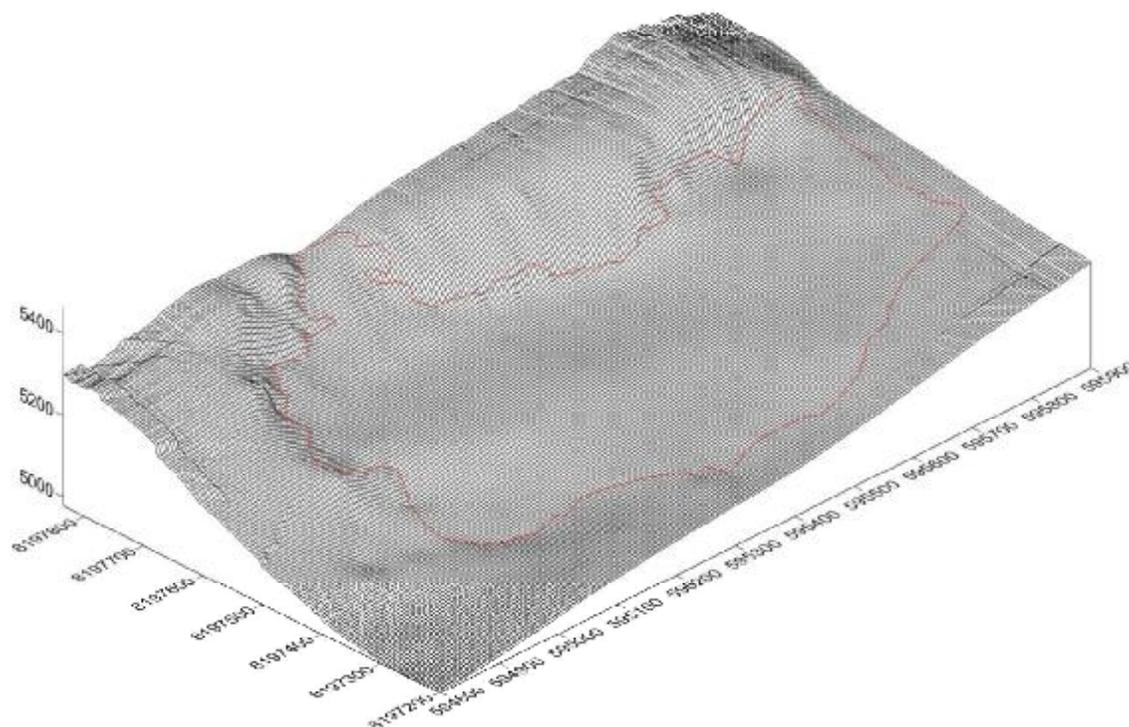


Figura 105: Modelo Dem raster del glaciar Charquini Sur del año 2013, la línea roja representa el contorno para ese año.

6.5. Estimación de la exactitud de la restitución.

Para determinar la exactitud de los modelos digitales de elevación (Dem's) del año 2006 y del año 2013 se procedió a plotear los puntos de las marcas de control medidas en el campo con el GPS diferencial (ver 6.1.3.3.) sobre las fotografías de dichos años respectivamente para medir y calcular la diferencia en XYZ existente en el sector del punto plotado.

6.5.1. Modelo 2006.

Se procedió a plotear las coordenadas de las marcas MX1, MX2, MX4, MX5, sobre los pares estereoscópicos correspondientes al 2006 en ArcGis 10 (Figura 106), tales marcas del tipo "X" fueron elegidas debido a que se encuentran pintadas sobre roca por lo que estas no sufren cambios importantes durante el periodo 2006 - 2013 en comparación con el glaciar y también porque fue más fácil identificarlas.

Una vez ploteadas las marcas se procedió a ajustar el paralaje hasta lograr la visión 3D, una vez alcanzada se anotó las nuevas coordenadas XYZ ya ajustada (Tabla 29),

para realizar una diferencia entre la ploteada y la ajustada, de este modo tener la diferencia de posición en XYZ para luego promediarlas y tener una referencia más clara de la exactitud que se tiene en nuestro modelo.

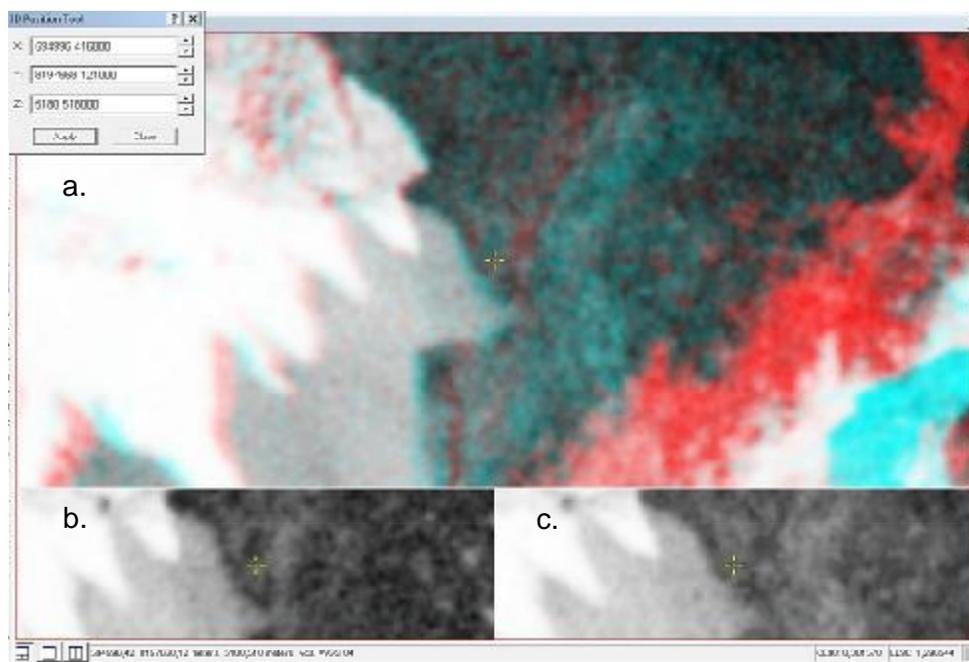


Figura 106: Punto MX5 (color amarillo) sobre el par estereoscópico del 2016, se observa un pequeño desplazamiento de la cruz entre las pantallas b y c.

Al realizar el ploteo pudo constatar que las marcas caían exactamente sobre la roca con un mínimo desplazamiento (Figura 106) donde el cuadro superior a. muestra una convergencia estereoscopia casi perfecta ya que en los cuadros c. (fotografía 144) y d. (fotografía 145) existe una diferencia posicional de la marca amarilla a la izquierda se ve que marca está ligeramente más cerca del límite con el glaciar a diferencia de la derecha, esto fue corregido ajustando el paralaje.

Pto	Coordenadas en WGS84			Coordenadas imagen 2006			Exactitud (m)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
MX1	595833,739	8197464,165	5283,771	595834,100	8197464,600	5286,327	0,361	0,435	2,556
MX2	595601,093	8197618,555	5273,622	595601,610	8197617,790	5277,178	0,517	0,765	3,556
MX4	595365,655	8197670,519	5197,199	595366,020	8197669,500	5199,500	0,365	1,019	2,301
MX5	594996,416	8197668,121	5180,518	594996,510	8197666,990	5183,125	0,094	1,131	2,607
Exactitud Total =							0,334	0,838	2,755

Tabla 29: Determinación de la exactitud sobre XYZ calculado sobre la fotografía del 2006 en coordenadas WGS84.

En la tabla 29 se observa que en las primeras 3 columnas XYZ se encuentran las coordenadas planteadas de las marcas tipo "MX" en el sistema UTM WGS84, en las siguientes 3 columnas se muestra las coordenadas de las marcas con los ajustes respectivos; y en las ultimas columnas se presenta la diferencia calculada entre las anteriores y al mismo tiempo en la última fila se tiene el promedio general que es la exactitud del modelo del 2006 donde el promedio en "Z" corresponde a 2,755 m y el mayor desplazamiento a 3.556. En planimetría la exactitud promedio es 0.558 m donde el máximo corresponde a 1.13 m en Y.

6.5.2. Modelo 2013.

Para el modelo del 2013 se tomó los puntos MX1, MX2, MX3, MX4, MX5, MT2, MT3, MT5 y se procedió a plotearlas sobre el par 2013 (Figura 107) tal como en el caso anterior.

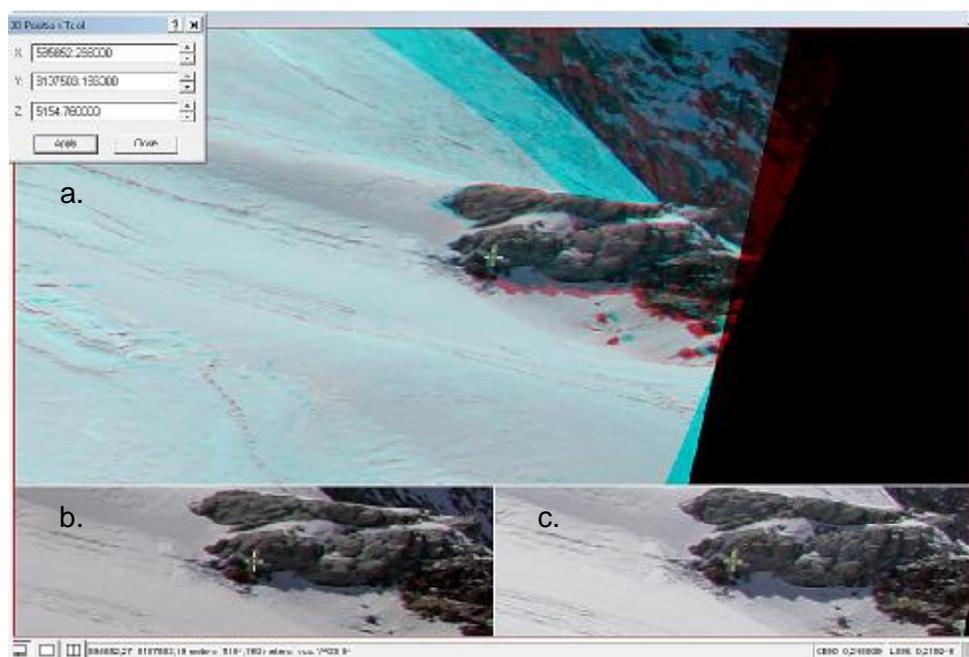


Figura 107: Punto MX1 sobre el par estereoscópico del 2013, se observa que la marca (Cruz blanca) coincide con el punto plotearlo (Cruz Amarilla), el recuadro a. muestra las coordenadas.

Se plotearon todos los puntos mencionados anteriormente y se calculó la diferencia que existía en coordenadas WGS84 (Tabla 30).

Pto	Coordenadas en WGS84			Coordenadas imagen 2013			Exactitud (m)		
MX1	595833,739	8197464,165	5283,771	595833,786	8197464,45	5283,764	0,047	0,286	0,007
MX2	595601,093	8197618,555	5273,622	595601,387	8197617,71	5273,571	0,294	0,848	0,051
MX3	595321,102	8197539,694	5149,524	595321,724	8197539,39	5149,653	0,622	0,3	0,129
MX4	595365,655	8197670,519	5197,199	595366,104	8197670,47	5197,182	0,449	0,046	0,017
MX5	594996,416	8197668,121	5180,518	594996,603	8197668,04	5180,323	0,187	0,083	0,195
MT1	595321,192	8197318,636	5093,674	595320,508	8197318,89	5094,425	0,684	0,235	0,751
MT2	595375,174	8197384,274	5121,100	595374,754	8197384,52	5121,521	0,42	0,244	0,421
MT5	595345,965	8197591,857	5160,216	595346,353	8197591,58	5160,586	0,388	0,28	0,37
Exactitud Total =							0,364	0,290	0,243

Tabla 30: Determinación de la exactitud sobre XYZ calculado sobre la fotografía del 2013 en coordenadas WGS84.

De esta manera obtenemos la exactitud para el modelo Dem del año 2013 generado anteriormente donde se determinó una exactitud altimétrica de 0.243 en Z y planimetría de 0.327 m. en promedio.

Calculados las exactitudes en planimetría y altimetría en cada modelo Dem se determinó que el promedio en altimetría es 1.499 y el planimetría 0.456 entonces promediando estos valores obtenemos una exactitud general de 0.977 m entre ambos modelos.

6.6. Estimación del balance de masa del glaciar de Charquini Sur mediante el método Volumétrico (Septiembre 2006 a Agosto 2013).

Para realizar del balance de masa, fue necesario sustraer la superficie del glaciar de los dos modelos digitales de elevación sobre el glaciar Charquini Sur. De esta manera, se pudo realizar un cálculo de diferencia volumétrica entre estos dos periodos o estadios del glaciar. Y así, evidenciar si el glaciar ha aumentado o ha disminuido su volumen a lo largo del periodo estudiado.

6.6.1. Sustracción de Dem's.

A partir de los Dem's del glaciar Charquini correspondientes a los años 2006 y 2013, se generó un *feature class* de tipo línea del contorno glaciar más antiguo en este caso del 2006 ya que representa la mayor superficie del glaciar, exportándolo en un archivo de texto con todos los vértices de dicha línea en formato *.bln, este contorno fue requerido por la herramienta *Blank* de Surfer para realizar la sustracción generando un nuevo

archivo Grid del Dem original considerando solo la información interna del contorno, se realizó este proceso para el 2006 (Figura 108) y para el año 2013 (Figura 109).

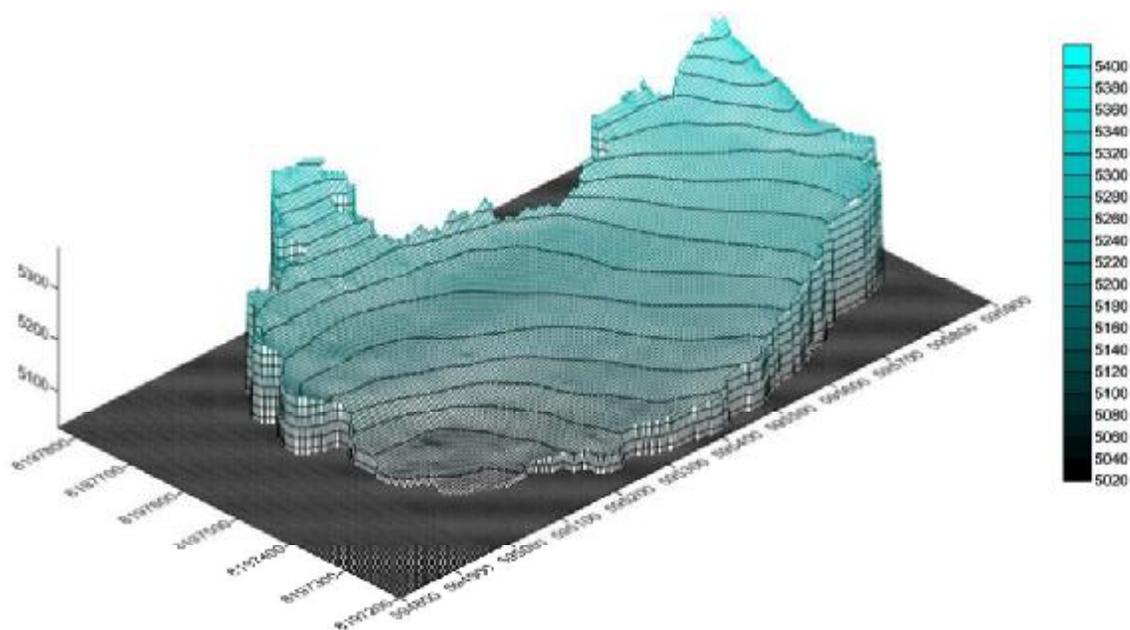


Figura 108: Modelo raster generado en 3D para el glaciar Charquini Sur, año 2006.

El nuevo Grid sustraído constituye el modelo digital de elevación concerniente a la masa de hielo del glaciar tomando como límites el contorno del año 2006.

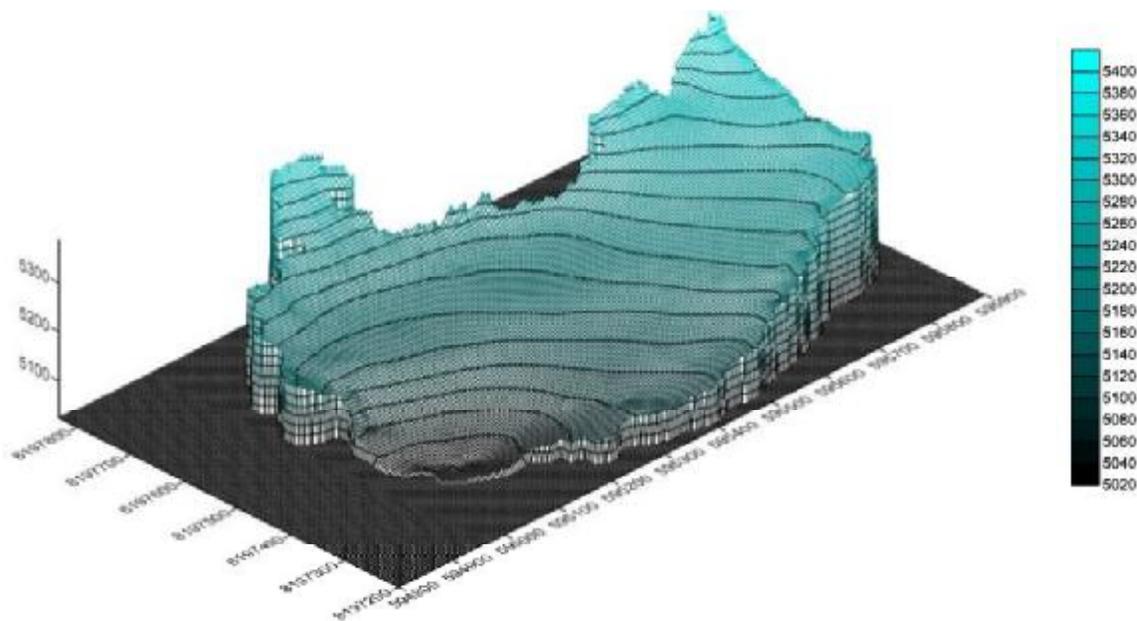


Figura 109: Modelo raster generado en 3D del glaciar Charquini Sur año para el año 2013.

Sustraídos los Gríds del glaciar Charquini Sur para ambos años se procedió a hacer una superposición para ver la variabilidad del glaciar Charquini Sur entre los años 2013 y 2006 (Figura 110), para tal caso se utilizó la herramienta *Overlay Maps* de Surfer.

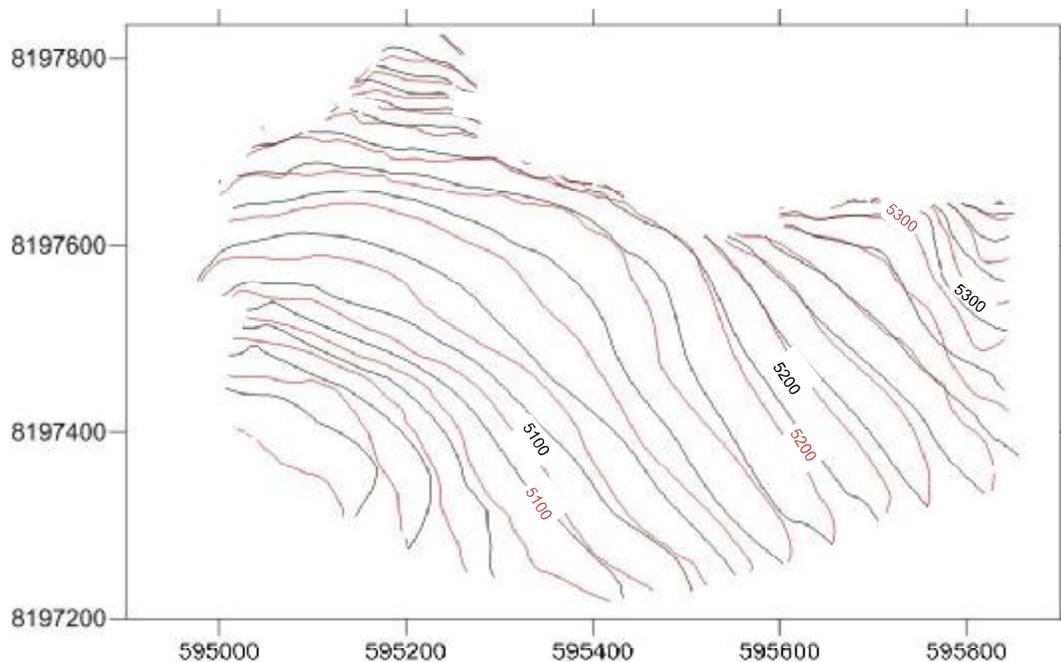


Figura 110: Superposición de las curvas de nivel del modelo 2013 (líneas negras) sobre el 2006 (líneas rojas).

En la Figura 110 se advierte dos tipos de curvas de nivel unas de color rojo correspondientes al año 2006 y otras color negro correspondientes al año 2013, estas curvas muestran que durante 7 años transcurrido en el Glaciar Charquini Sur:

- La zona frontal desarrolló un desplazamiento hacia la parte alta del glaciar que se traduce en una pérdida de masa.
- La zona superior sufrió un desplazamiento hacia la parte baja del glaciar mostrando ganancia de masa.

Por lo tanto durante 7 años el glaciar ha fluctuado retrocediendo en la zona de ablación y ganando masa en la zona de acumulación.

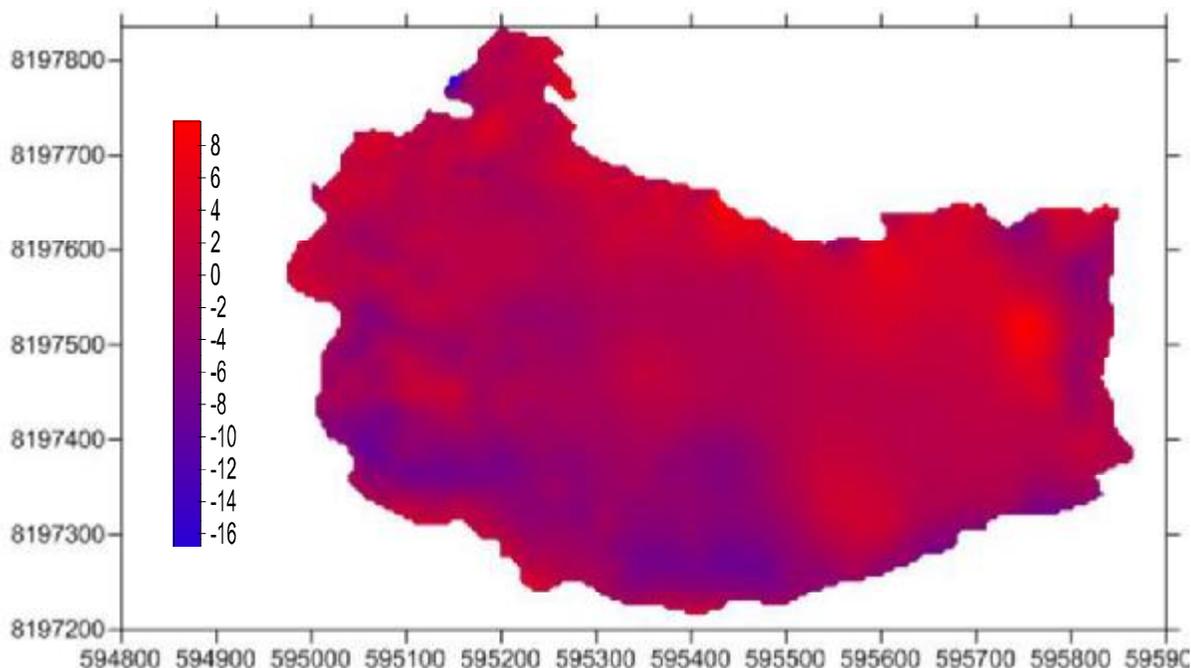


Figura 111: Modelo final del periodo 2006-2013, las zonas rojas muestran pérdida de masa y las azules ganancia de masa en el glaciar Charquini Sur.

La pérdida y ganancia de masa en el glaciar Charquini Sur es ilustrada en la Figura 111 obtenida a partir de la diferencia superficial del año 2013 y el año 2006 en el programa *SURFER*. En el modelo se observa que las zonas de color azul representan ganancia de masa y zonas de color rojo las zonas donde existe pérdida. Logrando advertir la existencia de una pequeña franja en la parte frontal del glaciar correspondiente a pérdida de masa que luego pasa a una tonalidad más azulada bien marcada mostrando una ganancia de hielo en el sector, seguida de una tonalidad intermedia que se hace más rojiza hacia la parte alta y Este del glaciar, finalmente se puede ver que también existen pequeñas zonas de ganancia en la parte alta del glaciar marcadas con una coloración azulada.

6.6.2. Cálculo del balance de masa 2006 - 2013.

Con los *Dem's* se procedió a realizar el cálculo volumétrico mediante la herramienta *Volume* de *SURFER*, con la cual se obtuvo el volumen neto de pérdida entre el año 2006 y 2013 igual a $-2664708.2828567 \text{ m}^3$.

Se determinó la superficie del glaciar Charquini Sur en los periodos 2006 y 2013 en base a los contornos ya mencionados obteniendo:

$$\begin{aligned}\text{Área del Glaciar Charquini sur año 2006} &= 346078 \text{ m}^2 \\ \text{Área del Glaciar Charquini sur año 2013} &= 306074 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Con una diferencia areal de -40004 m^2 y un promedio areal igual a 326076 m^2 para el glaciar, aplicando la fórmula:

$$Bn_{(Vol)} = \text{Volumen neto} / \text{Promedio areal (del glaciar)}$$

Para determinar el balance de masa tenemos:

$$Bn_{(Vol)} = -2664708.28 \text{ m}^3 / 326076 \text{ m}^2$$

$$Bn_{(Vol)} = -2664708.28 \text{ m}^3 / 326076 \text{ m}^2$$

$$Bn_{(Vol)} = -8.172 \text{ m.eq.hielo}$$

Para obtener el resultado en equivalente agua (y que sea comparable con el balance de masa del glaciar obtenido con el método glaciológico) se procede a multiplicar el resultado por la densidad del hielo igual a $0,9 \text{ g/cm}^3$ entonces:

$$Bn_{(Vol)} = -8.172 \text{ m} * 0,9 = -7.355 \text{ m.eq.agua}$$

Por lo tanto el balance de masa durante el periodo 2006 - 2013 es igual a -7.355 m.eq.agua que es equivalente a -7355 mm.eq.agua que puede expresarse también como 2398288.98 m^3 de agua.

El glaciar Charquini Sur durante los últimos 7 años habría tenido una variabilidad negativa promedio de -1050 mm.eq.agua por año que significa una pérdida anual de un metro en equivalente de agua.

6.7. Validación del método.

Para corroborar el resultado de balance de masa del glaciar Charquini Sur para el periodo 2006 - 2013 obtenido en este capítulo se realizó una validación de los pasos realizados utilizando fotogrametría terrestre que se citan a continuación:

1. Calibración de los Objetivos.

En esta etapa (visto en el capítulo 6) se calibraron y probaron tres objetivos con diferentes distancias focales: 15 mm, 50 mm y 20mm.

La calibración fue llevada a cabo con la ayuda del programa Calibration Toolbox de MATLAB para lo cual fue necesario obtener varias fotografías de un tablero

cuadrículado de dimensiones conocidas, la cantidad de fotografías no está estandarizada pero se asume que con una mayor cantidad de fotografías se obtiene resultados de distorsión óptimos.

La calibración realizada con el objetivo de 15 mm tuvo valores de deformación muy altos hacia los márgenes de la fotografía llegando hasta los 800 pixeles equivalente a 5.128 mm de desplazamiento de un punto en relación a su posición verdadera.

La calibración realizada con el objetivo de 50 mm mostró que la deformación alcanzaba hasta los 50 pixeles es equivalente a 0.32 mm, resultado aceptable para nuestro trabajo.

Objetivo con distancia focal de:	No de Fotografías	Deformación máxima (Pixel)	Deformación máxima (mm)
50 mm	17	50	0.32
15 mm	23	800	5.128

Tabla 31: Síntesis de resultados entre los objetivos de 50 mm y 15 mm.

Considerando los resultados de calibración de ambos objetivos obtenidos hasta este punto, se había decidido trabajar con el objetivo con distancia focal de 50 mm. Sin embargo, al realizar las pruebas en campo se pudo constatar que: Con el objetivo de 50 mm se necesitaba más de un par estereoscópico para cubrir toda el área de interés. Y que con el objetivo de 15 mm tiene demasiada distorsión en los bordes de la imagen. Por lo tanto se vio por conveniente utilizar la focal de 20 mm que fue calibrada en el laboratorio IRSTEA de Grenoble, Francia con la cual se realizó la adquisición de las tomas fotográficas para este trabajo.

2. Diseño de marcas de Control.

Las marcas de control necesarias para realizar la triangulación de las fotografías, fueron diseñadas en primera instancia para ser instaladas sobre el glaciar que para este trabajo fueron llamadas tipo MT, sin embargo estas marcas tendían a ser muy pequeñas para ser vistas a larga distancia por lo que en una segunda instancia se construyeron marcas que llamamos tipo ML de mayores dimensiones que se instalaron alrededor del glaciar, pero al poseer tales dimensiones y estar ubicadas en los bordes del glaciar, la mitad de estas quedaron inservibles por lo que en una tercera instancia se concluyó pintar las marcas de control sobre la misma roca llamadas tipo MX, estas

marcas resultaron ser ideales para el trabajo ya que estas perduran en el tiempo y son de muy fácil instalación.

Tipo de marca	Ventajas	Desventajas
ML	<ul style="list-style-type: none"> • De fácil observación a largas distancias. • Instalada fija en el campo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se deteriora rápidamente por el clima. • Difícil de instalar.
MT	<ul style="list-style-type: none"> • Sencilla y compacta. • De fácil instalación. 	<ul style="list-style-type: none"> • De difícil observación a largas distancias. • Debe instalarse cada vez que se desee hacer mediciones.
MX	<ul style="list-style-type: none"> • Perdura en el tiempo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Muchas veces de difícil acceso.

Tabla 32: Ventajas y desventajas de los tipos de marcas utilizadas en este trabajo.

3. Pruebas en Campo.

Una vez seleccionada la focal se procedió a hacer pruebas de cobertura, identificación del sitio para las tomas fotográficas y la escala de las marcas de control en el glaciar Charquini Sur.

Se instalaron las marcas de control tipo MT sobre todo el glaciar, se tomaron fotografías desde los flancos oeste y este del glaciar con los objetivos de 50 mm y 15 mm concluyendo que:

- Objetivo de 15 mm: Se tomaron 9 fotografías donde el objetivo abarcaba satisfactoriamente todo el glaciar pero no se lograba distinguir las marcas de control más lejanas.
- Objetivo de 50 mm: Se tomaron 17 tomas donde cada fotografía abarcaba un pequeño segmento del glaciar por lo que se requería la unión de 5 fotografías para cubrir todo el glaciar, las marcas se lograban apreciar satisfactoriamente.

Se concluyó que el mejor sitio desde donde tomar las fotografías era desde el flanco Este debido que presentaba mínimas obstrucciones visuales causadas por el relieve de la nieve.

Se descartó la utilización de la focal de 50 mm debido a la gran cantidad de fotografías que requerirían ser procesadas en la triangulación aumentando la cantidad de mediciones y la propagación de los errores. Si bien empleando una aerotriangulación es posible triangular varios pares estereoscópicos, el gran inconveniente en fotogrametría terrestre corresponde a la diferencia de escalas de cada estéreo-par

producto de que la distancia de cada fotografía varía en función de una óptima localización y obviamente del relieve a partir del cual se está adquiriendo las imágenes.

Finalmente se realizaron las pruebas con el objetivo de 20 mm el cual poseía valores aceptables de deformación, de escala y de cobertura logrando cubrir todo el glaciar con 2 fotografías (parte superior y parte inferior del glaciar).

4. Triangulación.

En esta etapa realizar correctamente la orientación externa de las fotografías es importante. Para el caso de las fotografías del año 2013 se aplicó la metodología de fotogrametría terrestre, en donde se tuvo que adecuar las condiciones de toma terrestre y simular que fueron tomadas por un vuelo aéreo, por lo que se procedió a hacer la transformación de las coordenadas de las marcas de control medidas, este proceso como cualquier otro de transformación puede generar un mínimo error debido a las operaciones de redondeo que se realizan ya que se utilizaron coordenadas auxiliares que para este trabajo llamamos "Coordenadas Orima".

5. Restitución Fotogramétrica.

Esta etapa del trabajo tuvo algunos inconvenientes tanto para la restitución del par fotogramétrico 144 – 145 del año 2006 y los pares fotogramétricos 267 – 282 y 271 – 281 del año 2013 debido al bajo contraste de color en algunos sectores sobre la nieve, este factor influyo en la cantidad de punto medidos que se obtuvieron para la generación de los modelos digitales de elevación ya que muchas zonas del glaciar presentaban una cobertura de nieve con una reflectancia clara y homogénea dificultando de este modo la medición de la altura exacta del punto homólogo en ambas fotografías. En este sentido, se obtuvo una cantidad moderada de puntos en la zona de la masa de hielo del glaciar una mayor cantidad de puntos hubiese ayudado a construir un modelo digital mucho más exacto.

6. Estimación de La exactitud.

En esta etapa se realizó la comparación las coordenadas de las marcas de control medidas con el GPS y las coordenadas de las marcas de control en las fotografías trianguladas mediante la fotogrametría terrestre. Esta comparación, nos muestra cuánto de desplazamiento se obtuvo, obteniéndose una exactitud promedio de 0.299 o de 30 cm el valor obtenido cual podría repercutir en el resultado final.

Finalmente de corroborar el resultado del balance de masa obtenido en este capítulo con el método volumétrico, se realizó una comparación con la acumulada del balance de masa obtenida mediante el método glaciológico para el glaciar Charquini Sur, de esta manera el método volumétrico muestra un balance de masa igual a -7355 mm.eq.agua entre el periodo 2006 – 2013 y el método glaciológico obtuvo una acumulada para el mismo periodo de -6960 mm.eq.agua (Figura 112). Ambos casos de carácter negativo o de pérdida en términos del glaciar.

6.8. Análisis de resultados.

Para determinar si el resultado de balance de masa del glaciar Charquini Sur durante el periodo 2006 - 2013 obtenido con el método volumétrico en el presente trabajo es coherente se realizó una comparación con los resultados obtenidos hasta la fecha por el proyecto GREAT ICE que utilizan el método glaciológico.

Se ploteó los resultados obtenidos mediante el método glaciológico desde el año hidrológico 2006 hasta el 2013 y el resultado obtenido con el método volumétrico (Figura 12).

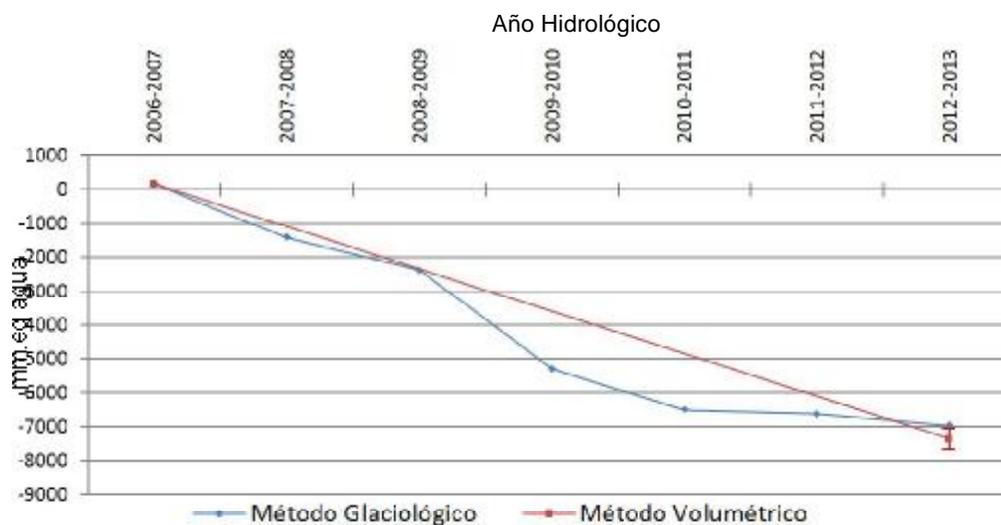


Figura 112: Diagrama de comparación entre el método volumétrico y el método glaciológico para el periodo 2006 – 2013 del glaciar Charquini Sur.

La línea azul correspondiente al método glaciológico presenta una tendencia negativa que va cambiando con cada año hasta el año 2013 observándose mayor pérdida durante los años hidrológicos 2008 - 2009 y 2009 - 2010 con una pérdida de 2921

mm.eq.agua, sin embargo la línea roja que corresponde al método volumétrico es una línea recta ya que solo se obtuvo un valor en este trabajo mostrando una pérdida promedio de - 1050 mm.eq.agua por año equivalente a una pérdida anual de una lámina de un metro.

Si bien ambos métodos muestran una tendencia negativa, significando una pérdida de masa de hielo que se traduce en retroceso sufrido por el glaciar Charquini Sur, (balances de masa negativos) se tiene una buena correlación en el valor final (año hidrológico 20123 - 2013) donde el método volumétrico está ligeramente por debajo del glaciológico con una diferencia de - 365 mm.eq.agua (entre estos dos métodos) equivalente 119017 m^3 de agua llegando a ser el 4.9% del porcentaje total de pérdida.

El factor que podría explicar la diferencia entre el método glaciológico y el método volumétrico es la exactitud que se habría calculado en la sección 6.5.2. sobre fotografías trianguladas del año 2013, que es igual a 0.299 m, por lo que el resultado final mediante el método volumétrico igual -7355 mm.eq.agua tendría una tolerancia de ± 299 mm.eq.agua.

Podría hacerse una mejor correlación entre ambos métodos, realizando el cálculo del balance de masa mediante ambos métodos en paralelo para los posteriores años hidrológicos a la presentación del presente trabajo.

6.9. Ventajas y Desventajas propuestas por el trabajo.

Durante la elaboración de este trabajo se comprobó que la metodología fotogramétrica tiene las siguientes ventajas:

- Es económica ya que se realiza un solo gasto para la construcción de marcas de control, para la adquisición de una cámara y objetivo, pudiendo ser reutilizados para posteriores mediciones.
- Es flexible a momento de escoger el día para adquirir las tomas fotográficas, pudiendo anticipar condiciones climatológicas.
- Evita que se generen errores humanos durante la toma de datos (método glaciológico).
- Se genera un registro de modelos DEM que puede ser utilizado para otros estudios.

Las principales desventajas de la metodología fotogramétrica:

- Cuando no existe un alto contraste sobre la superficie del glaciar es difícil realizar la restitución fotogramétrica.
- Es necesario instalar y medir los puntos de control móviles (marcas tipo MT en el caso de este trabajo) en el campo cada vez que se realice la adquisición fotogramétrica.

Esta metodología puede ser utilizada para modelar superficies rocosas o afloramientos, donde las marcas de control deben ser instaladas y medidas, tomar fotografías previas para la calibración. Las fotografías tomadas conformaran los pares estereoscópicos para generar el modelo tridimensional DEM del cual extraer información estructural, sedimentaria, etc.

Si se requiere determinar o medir movimientos de tierra que involucren un cambio de volumen o en la superficie de interés se recomienda instalar una malla de marcas de control fija alrededor de la zona y otras marcas móviles que serán instaladas sobre la masa de tierra antes de cada toma fotográfica, el periodo de tiempo cada adquisición de fotografías en el campo estará en función a las necesidades requeridas por el trabajo.

CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones.

Durante del desarrollo del presente trabajo, se realizó el cálculo del balance de masa del glaciar Charquini Sur por el método glaciológico en base a mediciones in-situ y mediciones previas realizadas por el proyecto GREAT ICE del IRD, entre los años 2006 y 2013.

En el presente trabajo se realizó el cálculo del balance de masa del glaciar empleando el método volumétrico mediante fotogrametría aérea digital y fotogrametría terrestre digital.

El modelo digital de elevación del glaciar correspondiente al año 2006 fue generado en base a fotografías aéreas obtenidas por el Servicio Nacional de Aerofotogrametría (SNA) por encargo del IRD para fines glaciológicos. El modelo digital de elevación de la superficie del glaciar correspondiente al año 2013 fue realizado en base a fotografías terrestres realizadas con una cámara semi-profesional Canon EOS 5D Mark II con un objetivo de 20 mm que constituye el primer trabajo en el país en la aplicación del método de fotogrametría terrestre a estudios glaciológicos.

En este sentido las principales conclusiones alcanzadas por el presente trabajo de investigación son resumidas de la siguiente forma:

- Se identificaron geformas típicas de una región de alta montaña en el cerro Charquini en base a fotografías aéreas del vuelo realizado el año 2006

(resolución espacial de 0.35 cm) donde en la parte alta se encontraron circos glaciares, aristas, canchales y para la parte baja morrenas, depósitos de till, canales, abanicos y valle glaciario que figuran en el mapa geomorfológico elaborado por este trabajo, Anexo 2.

- Se determinó que para la calibración de un objetivo mayor cantidad de fotografías para ser medidas dará mejores resultados en la obtención del modelo de distorsión, siendo 25 una cantidad aceptable.
- Objetivos para cámaras con una distancia focal pequeña (como ser el caso de una focal de 15 mm) garantizan una gran cobertura pero las fotografías obtenidas tienden a presentar mayor deformación y la resolución se ve amenazada si se desea realizar mediciones precisas.
- Las marcas de control a ser utilizadas deben tener un tamaño adecuado, pintadas con un color que contraste que en el entorno donde van a ser instaladas con el fin de mejorar las condiciones para su identificación y medición en la fotografías. También es importante que estén bien distribuidas para de este modo generar mayor cantidad de puntos de enlace durante la triangulación.
- La focal de 20 mm presentó las mejores condiciones para el desarrollo de este trabajo, tanto desde un punto de vista geométrico (distorsiones) como cualitativo (recubrimiento del glaciar con solamente 2 pares estereoscópicos).
- Realizar pruebas preliminares en el campo mejora los criterios de elección de equipo y los recursos necesarios para realizar un trabajo fotogramétrico.
- El recubrimiento del área de estudio con una red de puntos de control bien distribuida genera un modelo digital más confiable en coordenadas planimétricas como altimétricas. Los valores residuales de una aerotriangulación solamente son válidos en el interior de la red de puntos de control. Al exterior de la red, la precisión absoluta de los puntos 3D puede variar en una orden de magnitud y pueden aumentar exponencialmente hacia los bordes de las fotografías.
- Medir correctamente los puntos de control reduce el error que podría llegar a generarse durante la aerotriangulación. Además, garantiza el adecuado posicionamiento de los centros de perspectiva de cada fotografía en el sistema de coordenadas definido.

- Generar una red de puntos de enlace con una cantidad mínima de 25 puntos por par estereoscópico (patrón Von Grüber) mejora los cálculos de triangulación de las fotografías.
- Los modelos digitales de elevación se construyen en función a los puntos restituidos en los pares estereoscópicos. Por lo tanto, para generar un Modelo Digital de Elevaciones con alta precisión, las mediciones tienen que estar bien realizadas (precisión del operador en 3D), ser revisadas y corregidas simultáneamente (ej. El uso del Terrain Editor).
- Los valores de exactitud obtenidos para el modelo del año 2013 refleja una exactitud promedio de 0.30 cm en xyz por punto restituido. Para el análisis del Balance de Masa del glaciar de Charquini Sur, este valor es aceptable ya que es similar con el valor obtenido para las fotografías de 2006. En nuestro caso podría reducirse si los pasos de preparación, triangulación y restitución descritos son realizados de la mejor forma posible y tratando de adquirir las fotografías con un excelente contraste sobre el glaciar (que exista poca cobertura de nieve sobre el glaciar en el momento de las tomas fotográficas).
- Se determinó el balance de masa anual en el periodo 2012-2013 para glaciar Charquini Sur igual a una lámina de -333 mm.eq.agua aplicando la metodología glaciológica, esto significa que el glaciar Charquini Sur sufrió una pérdida de masa. El balance acumulado correspondiente al periodo 2006-2013 es igual a -6960 mm.eq.agua que corresponde a una importante pérdida de masa de hielo durante 7 años.
- Se describió y aplicó el método volumétrico mediante fotogrametría aérea digital (fotografías del año 2006) y mediante fotogrametría terrestre digital (fotografías del año 2013) obteniendo el balance de masa acumulado del Glaciar Charquini Sur durante el periodo 2006-2013 que es igual 2398288.98 m³ de agua o a una lámina de -7355 mm.eq.agua, demostrando un retroceso importante con un promedio anual aproximando de -1050 mm.eq.agua por año.
- Luego de realizar una comparación de resultados entre el método glaciológico y volumétrico para el periodo 2006 - 2013 se encontró que la diferencia de -365 mm.eq.agua o 119017 m³ en volumen de agua que vendría a ser un 4,9% del porcentaje total de pérdida.

- Los resultados obtenidos con el método volumétrico aplicando fotogrametría terrestre son satisfactorios ya que pudo comprobarse que estos valores son concordantes con otro método completamente independiente (método glaciológico) y puede llevarse a cabo sistemáticamente durante todo el año, constituyendo a esta metodología como un aporte a las investigaciones glaciológicas para nuestro país.
- En base a la comparación de métodos realizada, se concluye que mediciones llevadas a cabo por el proyecto GREAT ICE sobre el glaciar Charquini Sur utilizando el método glaciológico son consistentes, así como su interpretación en términos de variación climática.
- La metodología fotogramétrica es económica reduciendo costos, es flexible para elegir el día de las tomas, reduce errores humanos que podrían generarse, se genera un registro de modelos DEM que puede ser utilizado para otros estudios.
- Cuando no existe un alto contraste sobre la superficie del glaciar es difícil realizar la restitución fotogramétrica. Realizar la instalación y medición de marcas móviles cada vez que se vaya a realizar tomas fotográficas.

7.2. Comprobación de Hipótesis.

Se comprobó que la fotogrametría terrestre actualmente se constituye en una técnica que permite realizar mediciones de balance de masa del Glaciar Charquini Sur con una buena precisión, por lo que su utilización es óptima para continuar con los estudios en dicho glaciar.

7.3. Recomendaciones y perspectivas.

Durante el desarrollo de este trabajo se consideró muy relevante los siguientes aspectos para desarrollar cualquier trabajo empleando fotogrametría terrestre:

1. Calibrar la focal de la cámara con fotografías tomadas in-situ previas a la adquisición de las tomas fotográficas (el día de la toma).
2. Para la aplicación de la metodología fotogramétrica se sugiere seleccionar una focal adecuada, de tal modo que la deformación sea mínima y la toma cubra toda el área de interés.

3. Asegurarse que las coordenadas de la estación base estén concordes al sistema de coordenadas utilizadas en el trabajo (de preferencia jalar las coordenadas desde un punto geodésico de primer orden).
4. Es indispensable realizar la medición de los puntos de control con un GPS diferencial ya que presenta mayor precisión, menor a 5 cm tanto en altimetría como en planimetría.
5. Una focal de 20 mm de distancia focal puede ser utilizada para trabajos donde el objeto de interés se encuentre a una distancia de 1 Km o menor. Trabajos donde el objeto se encuentra a una distancia menor a los 0.5 Km de distancia de la cámara se recomienda una focal de 50mm.
6. Volver a medir las marcas de control móviles que se encuentren sobre bloques de roca o superficies que estén sometidas a movimiento cada vez que se realice la adquisición fotográfica.
7. Realizar un óptimo control y correcciones pertinentes en el momento de la triangulación fotogramétrica en base a las marcas de control o apoyo.
8. Realizar una comparación de resultados entre las coordenadas obtenidas en base a restitución fotogramétrica y coordenadas obtenidas en base a mediciones mediante otro método topográfico, de esta forma se validara la triangulación fotogramétrica, antes de empezar con la restitución fotogramétrica propiamente dicha.

En cuanto a las perspectivas y como una extensión del presente trabajo se propone:

1. Continuar con las mediciones anuales sobre el glaciar Charquini Sur utilizando fotogrametría terrestre para mejorar la exactitud y los modelos a generar.
2. La fotogrametría terrestre puede ser aplicada en diferentes ramas de estudio en geología como en Geomorfología en el estudio de geoformas, Geotecnia en el estudio y control de deslizamientos, Sedimentología para determinar tasas de erosión y acumulación en una cuenca, Geología Estructural para tener un registro grafico de las estrechuras facilitando su reconocimiento y estudio.

Bibliografía

- Abott, M. (2000). *Holocene hydrological reconstruction from stable isotopes and paleoclimatology. Cordillera Real, Bolivia*. Quaternary Science Reviews. 1801-1820.
- Argollo, J. (1994). *Geología del Plio-cuaternario de Bolivia*. La Paz, Bolivia: UMSA. 285.
- Braulio, C. (2005). *Principios básicos de la fotogrametría acual*. Mexixo D.F, Mexico: Instituto Politécnico Nacional. 146.
- Cartagena, R. (1998). *El Glaciar Chacaltaya*. Estudios del balance glaciológico, contribución y análisis del retroceso de un glaciar tropical. La Paz, Bolivia. Tesis de Grado. UMSA. 219.
- Derrau, M. (1978). *Geomorfología*. Barcelona, España: Ariel. 528.
- Fernandez, S., Thompson, S. (1995). *Hoja 5945 MILLUNI*. La Paz: Publicación SGB Serie I-CGB-34.
- Francou, B., Pouyard, B. (2004). *Metodos de observacion de glaciares en los Andes tropicales*. La Paz Bolivia. 243.
- Furrer, G. (1968). *Unterswchungen an Strukturböden in Ostspitbergen, ihre Bedeutung für die Erforschung rezenter und fossiler Frostmusterformen in den Alpen baw im Alpen vorland*. Polarforschung. 202-206.
- Gorinova, E. Jiménez, N., Alarcón, H., Toro, M., Vargas, C. (2006). *Estudio petrológico y geoquímico de los granitoides mesozoicos de la zona Huayna Potosí - Zongo*. La Paz, Bolivia: Memorias de XVII Congreso Geológico Boliviano. 99-102.
- Guilderson, T. Shrag, D. (1998). *Abrupt shift in subsurface temperatures in the tropical pacific associated with changes in El Niño*. Cambridge, USA: Harvard University. 240-243.
- Gutierrez, M. (2009). *Geomorlogía*. Madrid, España: Pearson Educación S.A. 898.
- Haylock, M. R. (2006). *Trends in total and extreme South American rainfall in 1960-2000 and links with sea surface temperature*. Journal of Climate. 1490-1512.
- IPCC. (2001). *The Scientific Basins. Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. United Kingdom - USA.
- IPCC. (2008). *Cambio climatico 2007 informe de síntesis*. Ginebra 2, Suiza: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

- Jauregui, J. (1969). *Estúdio geológico minero de la región de Milluni - Zongo*. La Paz, Bolivia. Tesis de Grado. UMSA. 100.
- Jordan, E. (1991). *Die Gletscher der Bolivianischen Anden*. Stuttgart Germany: Franz Steiner Verlag. 365.
- Kaser, G., Hasternrath, S. and Ames, A. (1996). *Mass Balance Profiles on Tropical Glaciers*. Innsbruck, Austria: University of Wisconsin. 75-81.
- Kaser, G. (1999). *A review of the modern fluctuations of tropical glaciers*. Innsbruck, Austria: Institut für Geographie. 93 - 103.
- Lehmann, G. (1975). *Fotogrametría*. Barcelona, España: Editores Tecnicos Asociados Lerma. 412.
- Leonardini, G. (2010). *Análisis mensual de los balances de masa glaciológico e hidrológico del glaciar tropical Zongo (Bolivia)*. La Paz, Bolivia. Tesis de Grado. UMSA. 136.
- Lliboutry, L. (1956). *Nieve y glaciares de Chile. Fundamentos de glaciología*. Santiago, Chile: Universidad de Chile. 470.
- Luhman, T. (2006). *Close Range Photogrammetry Principles, Methods and Applications*. Scotland, UK: Whittles Publishing. 510.
- Macedo, J. (2009). *Restituidores fotogramétricos en la facultad de ingeniería de la UNAM*. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México. 156.
- Martinez, E. (1972). *Sísmica en la región de Zongo*. La Paz, Bolivia. Tesis de Grado. UMSA. 74.
- McBride, S., Robertson, R., Clark, A., Farrar, E. (1983). *Magmatic and metallogenetic episodes in the northern tin belt, Cordillera Real, Bolivia*. Geologische Rundschau. Volume 72. 685 - 713.
- Merle, J. (2006). *L'océan et climat*. Paris, France. 222.
- Montes de Oca, I. (2005). *Enciclopedia Geográfica de Bolivia*. La Paz, Bolivia: Atenea. 871.
- Parry, M., Canciani, O., Palutikof, J. (2008). *Conclusiones fundamentales del IPCC en relación con los impactos y adaptaciones al cambio climático. Boletín de la OMM57*. 78 - 85.
- Paterson, W. (1994). *The physics of glaciers*. Pergamon. Oxford, UK: Elsevier Science Ltd. 480.
- Rabatel, A. (2005). *Chronologie et interpretation paleoclimatique des fluctuations des glaciers dans les andes de bolivie (16°s) depuis le maximum du petit age*

glaciaire (17eme siecle). Grenoble, Francia: Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier. 196.

- Rabatel, A., Machaca, A., Francou, B., et Jomelli, V. (2006). *Glacier recession on Cerro Charquini (16S), Bolivia, since the maximum of the Little Ice Age (17th Century)*. Journal of Glaciology. 110 - 118.
- Ramirez, E. Machaca, A. (2011). *Determinación de Balances de Masa de los Glaciares del Nevado Illimani Mediante Técnicas Geodésicas*. La Paz, Bolivia: Informe Final. 43.
- Ramirez, E. Hoffman, G., Taupin, J.D. (2003). *A new Andean deep ice core from Nevado Illimani (6350m) Bolivia*. Bern, Switzerland: Universität Bern., 337 - 350.
- Ramirez, P., Alejano, L (2004). *Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*. Universidad Politécnica de Madrid. 300.
- Ramirez, E. (2001). *Small glaciers disappearing in the tropical Andes: a case-study in Bolivia: Glaciar Chacaltaya (16S)*. La Paz Bolivia: Journal of Glaciology. 187 - 194.
- Sánchez, A. (1977). *Estudio geológico-petrográfico del área de Chacaltaya*. La Paz, Bolivia. Tesis de Grado. UMSA. 124.
- Sánchez, M. (2004). *Análisis aplicado de métodos de calibración de cámaras para usos fotogramétricos*. Madrid, España: VIII Congreso Nacional de Topografía y Catografía. 15.
- Sempere, T. (2002). *Late Permian-Middle Jurassic lithospheric thinning in Peru and Bolivia, and its bearing on Andean-age tectonics*. Geologische Rundschau. 153 - 181.
- Sicart, J.E., Ribstein, P. Francou, B., Pouyaud, B. et Condom, T. (2007). *Glacier mass balance of tropical Zongo glacier, Bolivia, comparing hydrological and glaciological methods*. La Paz Bolivia: Global and Planetary Change. 27 - 36.
- Smith, T., Peterson, T., Lawrimore, J. and Reynolds, R (2005). *New surface temperature analyses for climate monitoring*. Maryland, USA: University of Maryland. 678 - 681.
- Soruco, A., Vincent, C., Francou, B., Ribstein, P., Berger, T., Sicart, J.E., Wagnon, P., Arnaud, Y., Favier, V., Lejeune Y. (2009). *Mass balance of Zongo Glacier, Bolivia, between 1956 and 2006, using glaciological, hidrological and geodetic methods*. Los Alpes Francia. 1 - 8.
- Soruco, A. (2012). *Medio siglo de fluctuaciones glaciares en la Cordillera Real y sus efectos hidrológicos en la ciudad de La Paz*. La Paz, Bolivia. El País. 227.

- Stephens, C., Levitus, S., Antonov, J. et Boyer, T.P (2001). *On the Pacific Ocean regime shift*. Geophysical Research Letters. 3721 - 3724.
- Suárez, R. (1994). *Léxico estratigráfico de Bolivia*. Cochabamba, Bolivia: Revista técnica de Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos. 227.
- Thibert, E., Blanc, R., Vincent, C. and Eckert, N. (2008). *Glaciological and volumetric mass-balance measurements: error analysis over 51 years for Glacier de Sarennes*. Los Alpes Francia. 522 - 532.
- Thompson, L.G., Davis, M.E., Mosley-Thompson, E., Sowers T.A., Henderson K.A., Zagorodnov V.S., Lin, P.N., Mikhailenko V.N., Campen R.K., Bolzan, J.F., Cole-Dai, J., Fracou, B. (1998). *A 25.000-year tropical climate history from Bolivian ice cores*. 1858 - 1864.
- Trenberth, K. (1997). *The definition of El Niño*. Colorado, USA: Bulletin of the American Meteorological Society. 2771 - 2777.
- Vargas, E. (1992). *La fotogrametría aérea y sus aplicaciones a estudios Geológicos y Geomorfológicos*. La Paz, Bolivia. UMSA. 436.
- Vergara, W. (2007). *Economic impacts of rapid glacier retreat in the Andes*. Eos, Transactions, American Geophysical Union. 261 - 264.
- Vincent, C. (2002). *Influence of climate change over the 20th Century on four French glacier mass balance*. 107.
- Vuille, M. F. (2008). *Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future*. Earth-Science Reviews. 79 - 96.
- Vuille, M., Bradley, R.S., Werner, M. et Keimig, F (2003). *20th century climate change in the tropical Andes: observations and model results*. Climatic Change. 75 - 79.
- Vuille, M. e. (2000). *Mean annual temperature trends and their vertical structure in the Tropical Andes*. Geophysical Research Letters. 3885 - 3888.

Anexos

Anexo1. Calculo del balance de masa en los Pits 1, 2 y 3 por el método glaciológico para el año 2006.

Pit 1	X	Y	Z
Posición GPS	19K 0595816	8197574	5283 m

Hn	# de muestra	M+TM	M-TM	Perímetro (cm)	Altura muestra (cm)	Altura Acumulada (cm)	Densidad cm/gr3	mm.eq.agua
	1	171	39	11,94	9	9	0,38	34,39
	2	170	38	11,94	9	18	0,37	33,51
	3	161	29	11,94	7	25	0,37	25,57
HS	# de muestra	obs.	Masa (g)	Perímetro (cm)	Altura muestra (cm)	Altura Acumulada (cm)	Densidad	mm.eq.agua
	1		549	33	13	13	0,49	63,35
	2		429	33	11	24	0,45	49,50
	3		151	33	13,5	37,5	0,13	17,42
	4		171	30	6	43,5	0,40	23,88
	5		649	30	19	62,5	0,48	90,62
	6		1036	31	28	90,5	0,48	135,47
	7		1037	31,5	30	120,5	0,44	131,33
	8		1506	31	42	162,5	0,47	196,93
	9		165	29,5	7	169,5	0,34	23,83
	10		364	32	10	179,5	0,45	44,67

870,47

Tabla 33: Cálculo del balance de masa para el pit numero 1.

Pit 2	X	Y	Z
Posición GPS	19K 0595692	8197577	5245 m

Hn	# de muestra	M+TM	M-TM	Perímetro (cm)	Altura muestra (cm)	Altura Acumulada (cm)	Densidad cm/gr3	mm.eq.agua
	1	178	46	11,94	9	9	0,45	40,56
	2	167	35	11,94	9	18	0,34	30,86
	3	160	28	11,94	9	27	0,27	24,69
	4	166	34	11,94	9	36	0,33	29,98
	5	169	37	11,94	9	45	0,36	32,62
	6	167	35	11,94	9	54	0,34	30,86
	7	173	41	11,94	9	63	0,40	36,15
	8	175	43	11,94	9	72	0,42	37,92
HS	# de muestra	obs.	Masa (g)	Perímetro (cm)	Altura muestra (cm)	Altura Acumulada (cm)	Densidad	mm.eq.agua
	1		255	32	9	9	0,35	31,29
	2		204	32	8	17	0,31	25,03
	3		493	32	14	31	0,43	60,50
	4		596	32	21	52	0,35	73,14
	5		364	31	14	66	0,34	47,60
	6		239	30	10	76	0,33	33,37
	7		299	30	8	84	0,52	41,75
	8		251	34	12	96	0,23	27,29
	9		717	32	19	115	0,46	87,99
	10		453	32	11	126	0,51	55,59
	11		1017	32	29	155	0,43	124,80
	12		502	32	14	169	0,44	61,60
	13		1092	32	29	198	0,46	134,01
	14		566	32	15	213	0,46	69,46
	15		1011	32	28	241	0,44	124,07
	16		624	32	17	258	0,45	76,58

1337,71

Tabla 34: Cálculo del balance de masa para el pit numero 2.

Pit 3	X	Y	Z
Posición GPS	19K 0595701	8197496	5222 m

Hn	# de muestra	M+TM	M-TM	Perímetro (cm)	Altura muestra (cm)	Altura Acumulada (cm)	Densidad cm/gr ³	mm.eq.agua
	1	164	32	11,94	9	9	0,31	28,22
	2	162	30	11,94	9	18	0,29	26,45
	3	168	36	11,94	9	27	0,35	31,74
	4	176	44	11,94	9	36	0,43	38,80
	5	167	35	11,94	9	45	0,34	30,86
	6	166	34	11,94	9	54	0,33	29,98
	7	159	27	11,94	5	59	0,48	23,81
HS	# de muestra		Masa (g)	Perímetro (cm)	Altura muestra (cm)	Altura Acumulada (cm)	Densidad	mm.eq.agua
	1		711	32,5	17	17	0,50	84,59
	2		556	32	17	34	0,40	68,23
	3		982	32	27	61	0,45	120,51
	4		1076	32	29	90	0,46	132,05
	5		547	32	15	105	0,45	67,13

682,36

Tabla 35: Cálculo del balance de masa para el pit numero 3.

Anexo2. Mapa geomorfológico del cerro Charquini, realizado a partir de la fotografía aérea del año 2006