



Ministerio de Defensa Nacional



Comando Conjunto de las Fuerzas Armadas



Ejército Ecuatoriano



Instituto Geográfico Militar

Simposio SIRGAS 2016

Quito, Ecuador
Noviembre 16 - 18, 2016

Instituto Geográfico Militar
www.igm.gob.ec / www.geoportaligm.gob.ec

SISTEMA DE ALTURAS PARA EL ECUADOR

E. Cañizares
Instituto Geográfico Militar

A. Tierra y C. Leiva
Grupo de Investigación Geoespacial
Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE

A. Staller y J.L.G. Pallero
ETSI en Topografía, Geodesia y Cartografía
Universidad Politécnica de Madrid



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACION PARA LA EXCELENCIA



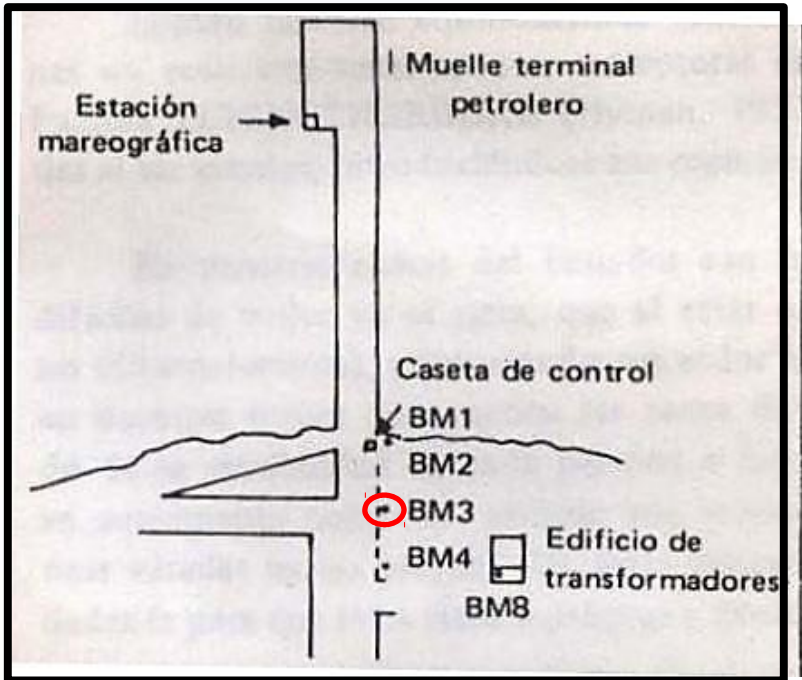
UTPL
UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

ANTECEDENTES

ECUADOR



Control vertical realizado a partir de nivelación geométrica



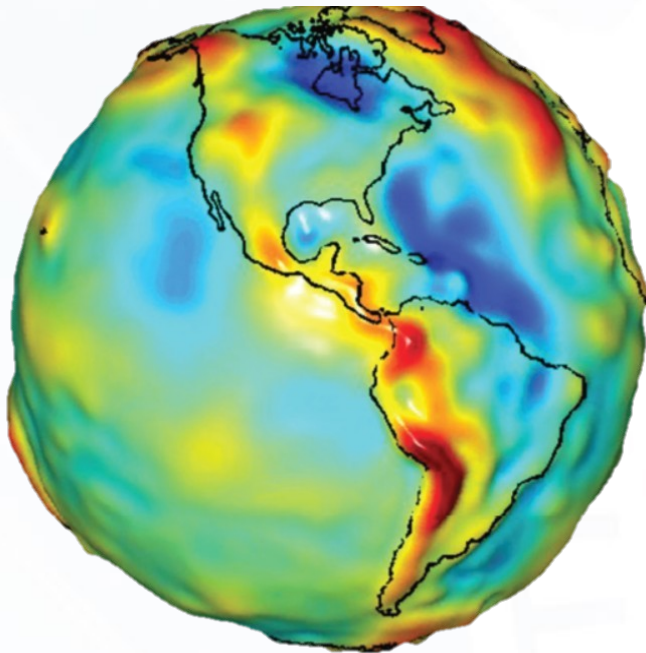
Fuente: Paredes, 1986



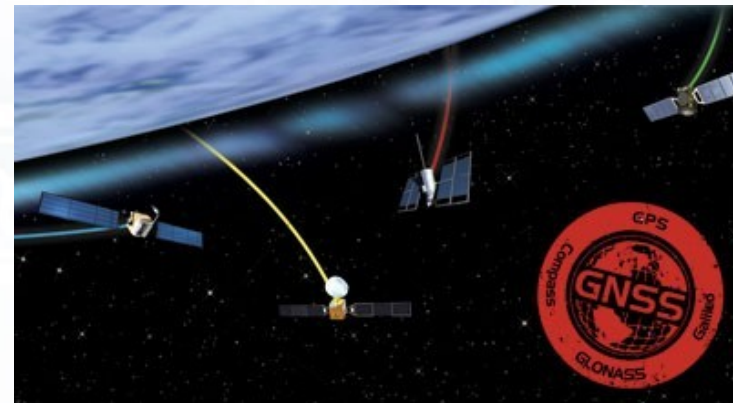
Fuente: IGM, 2015

PROBLEMA

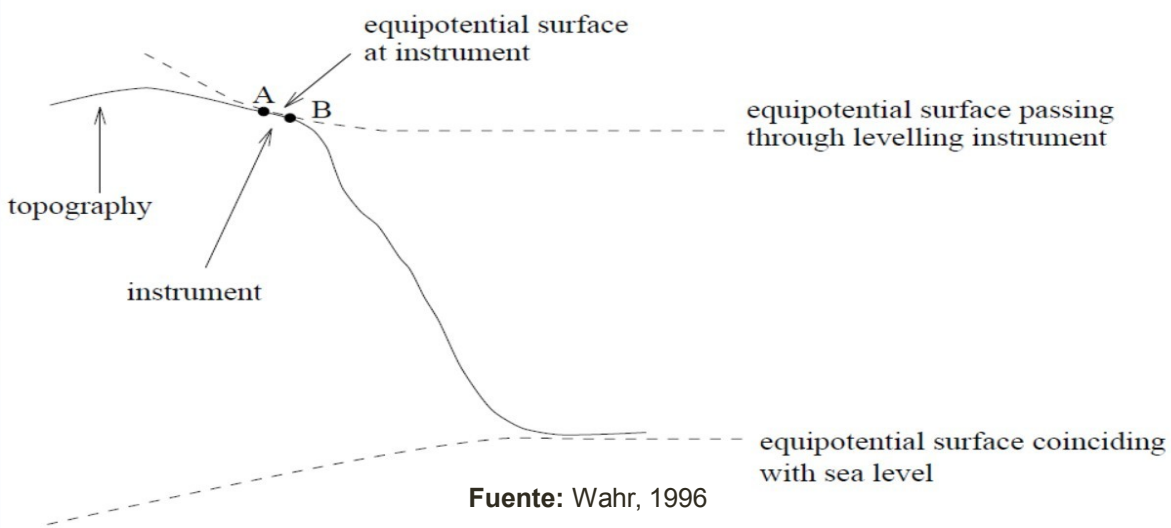
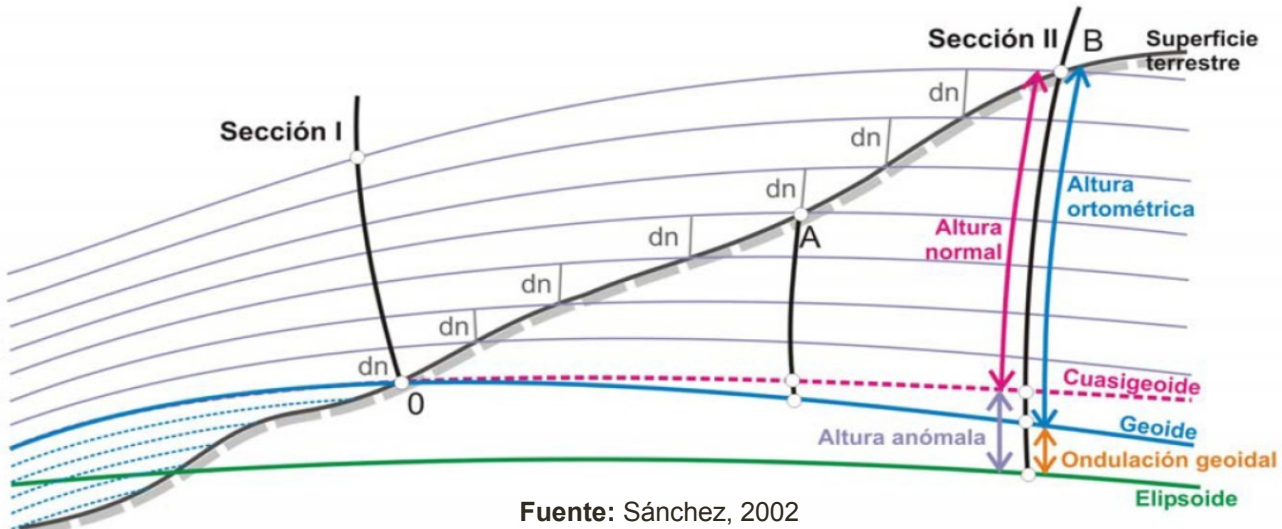
Redes de nivelación han sido ajustadas asumiendo el efecto del campo de gravedad como un error más de medición



Fuente: Paolo y Molina, 2010_

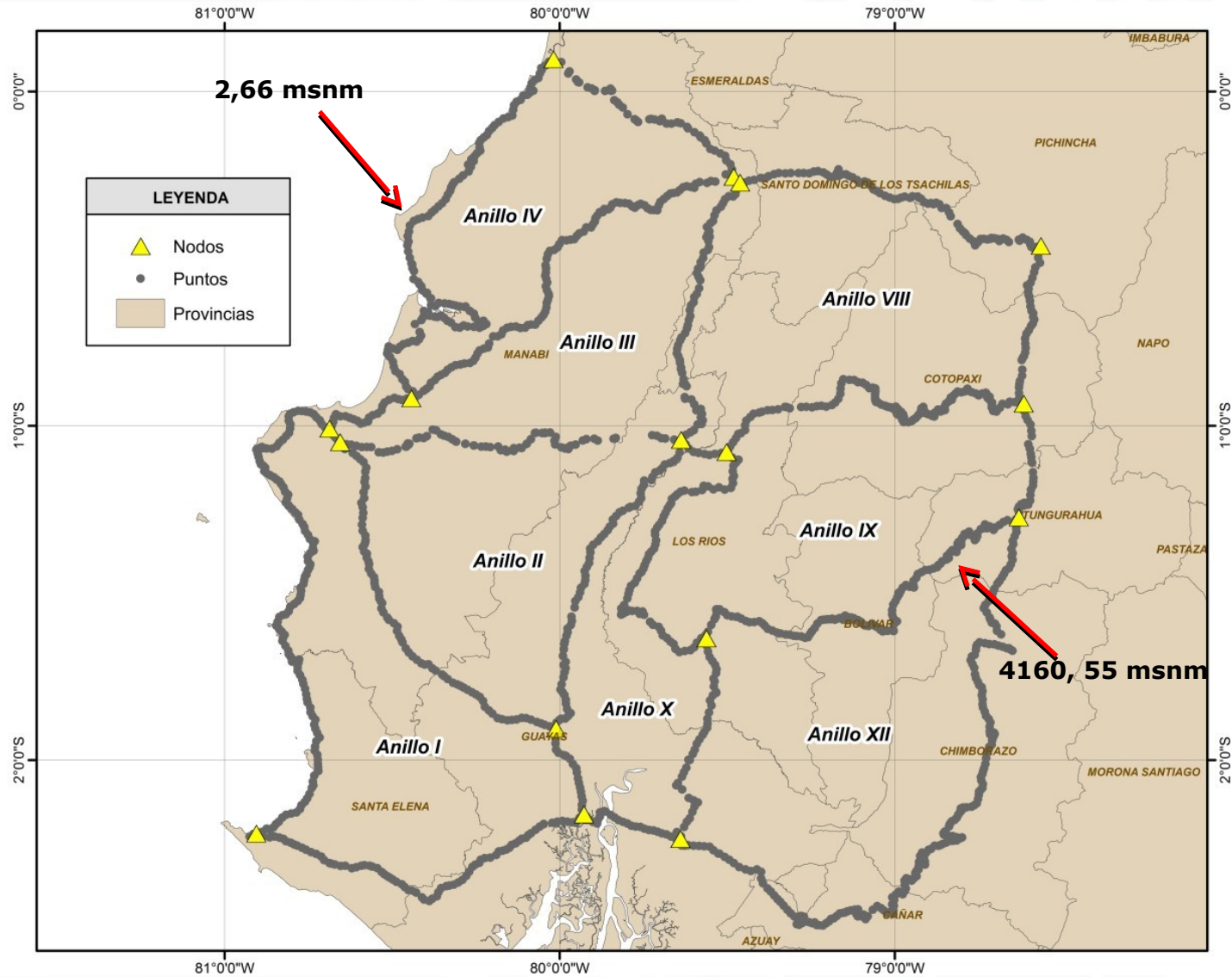


PROBLEMA





ÁREA DE ESTUDIO





Ministerio
de Defensa
Nacional



Comando Conjunto
de las Fuerzas
Armadas



Ejército
Ecuatoriano



Instituto
Geográfico
Militar

OBJETIVO

Analizar el comportamiento de los diferentes tipos de alturas en la zona de estudio, mediante el cálculo y ajuste de alturas físicas, con el fin de proponer el tipo de altura que mejor se ajusta a la realidad de la zona de estudio.



PROCEDIMIENTO

1. Recopilación de la información

2. Generación de una base de datos

3. Cálculo de alturas geométricas (niveladas)

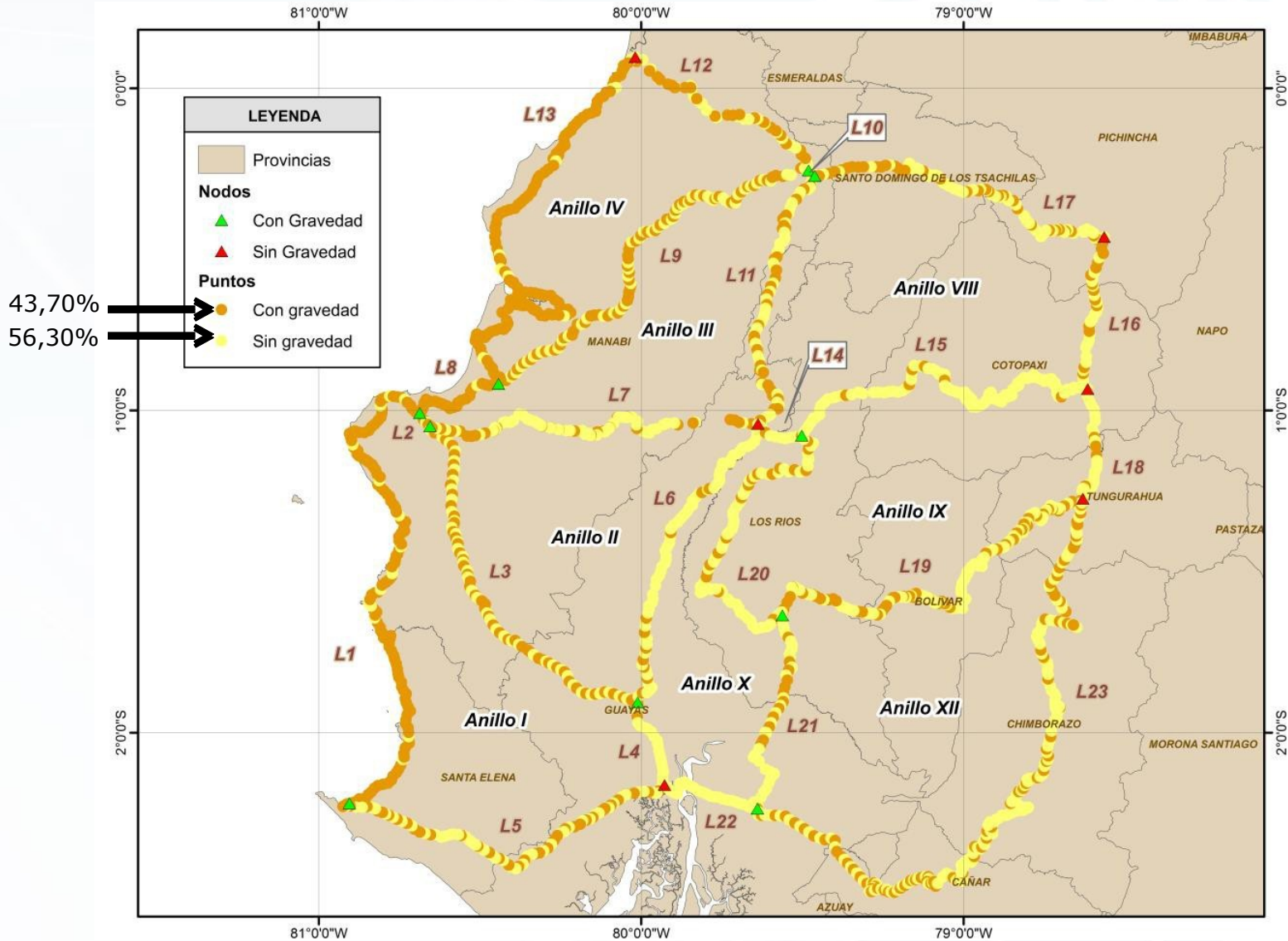
4. Cálculo de cotas geopotenciales

5. Ajuste de cotas geopotenciales

6. Cálculo de alturas físicas



RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

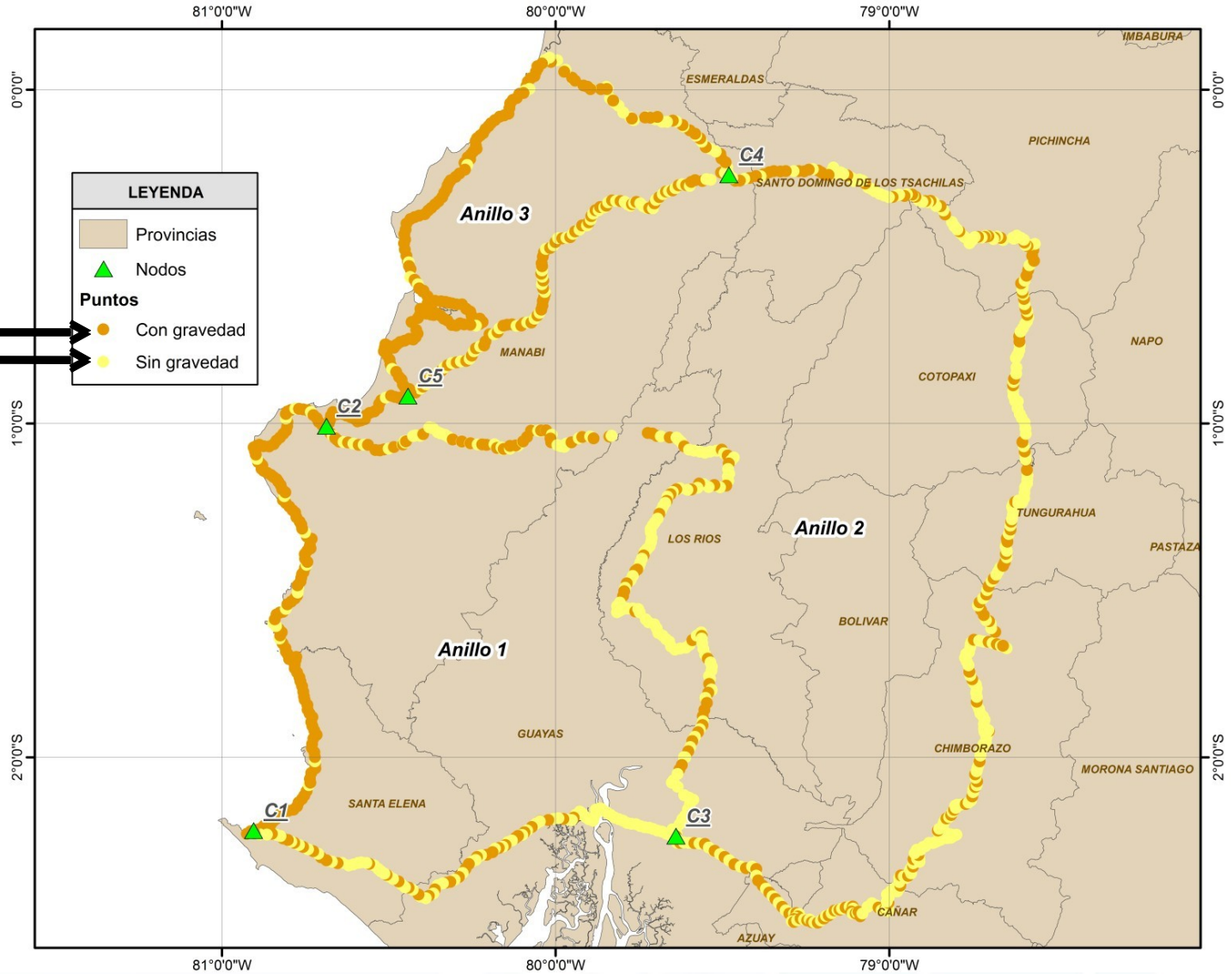




RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

48,30% →
 51,70% →

LEYENDA	
	Provincias
	Nodos
Puntos	
	Con gravedad
	Sin gravedad





Ministerio
de Defensa
Nacional



Comando Conjunto
de las Fuerzas
Armadas



Ejército
Ecuatoriano



Instituto
Geográfico
Militar

PROCEDIMIENTO

1. Recopilación de la información

2. Generación de una base de datos

3. Cálculo de alturas geométricas (niveladas)

4. Cálculo de cotas geopotenciales

5. Ajuste de cotas geopotenciales

6. Cálculo de alturas físicas



GENERACIÓN BASE DE DATOS

A

Pto. Inicio	Pto. Final	Longitud (km)	Desnivel (m)	Error de cierre (mm)	Gravedad (gal)	Latitud
C12	C13	1,82	4,8986	5,00	978,08959	-2,160000
C13	C14	1,81	4,3644	3,40	978,08786	-2,156667
C14	C15	1,69	-6,4383	4,50	978,08563	-2,146667
C15	C16	1,77	-2,9552	5,10	978,08738	-2,135000
C16	C17	1,62	0,2241	3,50	978,08506	-2,124722
C17	C18	1,45	-0,2743	-2,00	978,08246	-2,114444
C18	C19	1,71	0,2189	0,60	978,08206	-2,101111
C19	C20	2,26	-1,6211	4,90	0	-2,083050

B

Pto. Inicio	Pto. Final	Longitud (km)	Desnivel (m)	Error de cierre (mm)	Gravedad (gal)	Latitud
C60	C61	1,22	19,0181	3,40	978,10724	-1,625278
C61	C62	1,43	-9,7278	2,50	978,10775	-1,615833
C62	C63	1,50	-10,2521	-2,90	0	-1,606667
C63	C64	1,53	-4,3488	-1,30	0	-1,597778
C64	C65	1,54	-0,2341	-3,50	978,11048	-1,586389
C65	C66	1,75	37,3588	0,10	978,09731	-1,571944

C

Pto. Inicio	Pto. Final	Longitud (km)	Desnivel (m)	Error de cierre (mm)	Gravedad (gal)	Latitud
C61	C62	1,43	-9,7278	2,50	978,10775	-1,615833
C62	C65	4,57	-14,8349	-7,70	978,11048	-1,586389
C65	C66	1,75	37,3588	0,10	978,09731	-1,571944
C66	C67	1,59	56,3123	-2,50	978,08435	-1,566111

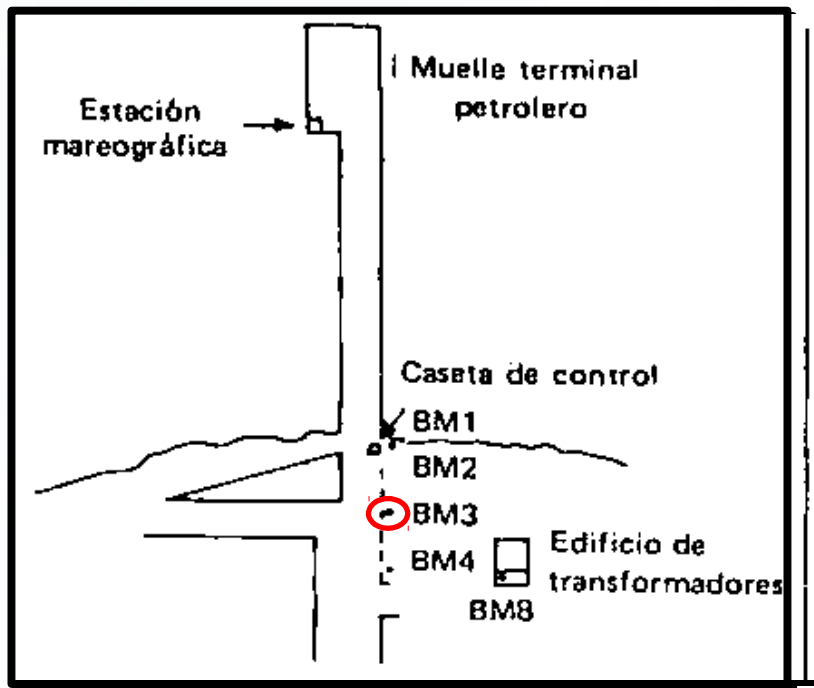


PROCEDIMIENTO

1. Recopilación de la información
2. Generación de una base de datos
- 3. Cálculo de alturas geométricas (niveladas)**
4. Cálculo de cotas geopotenciales
5. Ajuste de cotas geopotenciales
6. Cálculo de alturas físicas

CÁLCULO ALTURAS GEOMÉTRICAS

Estación Mareográfica 1948



Fuente: Paredes, 1986_

$$H_B = \frac{\Delta n_A^B - \Delta n_B^A}{2} + H_A$$

BM3 o M-R INOCAR
6,2707 msnm



Ministerio
de Defensa
Nacional



Comando Conjunto
de las Fuerzas
Armadas



Ejército
Ecuatoriano



Instituto
Geográfico
Militar

PROCEDIMIENTO

1. Recopilación de la información
2. Generación de una base de datos
3. Cálculo de alturas geométricas (niveladas)
- 4. Cálculo de cotas geopotenciales**
5. Ajuste de cotas geopotenciales
6. Cálculo de alturas físicas



CÁLCULO COTAS GEOPOTENCIALES

1 Diferencias de Potencial

$$\Delta C_A^B = \frac{g_A + g_B}{2} \Delta n_A^B$$

2 Cotas Geopotenciales

$$C_B = \frac{\Delta C_A^B - \Delta C_B^A}{2} + C_A$$

$$C_A = 0,0424H^2 + gH$$

$$H = 6,2707 \text{ msnm}$$

$$C_A = 6,1334 \text{ kgal} * m$$



PROCEDIMIENTO

1. Recopilación de la información
2. Generación de una base de datos
3. Cálculo de alturas geométricas (niveladas)
4. Cálculo de cotas geopotenciales
- 5. Ajuste de cotas geopotenciales**
6. Cálculo de alturas físicas



AJUSTE COTAS GEOPOTENCIALES

Tabla 1. Ecuaciones de condición

ECUACIONES				
D1	=	C2	-	C1
D2	=	C3	-	C2
D3	=	C1	-	C3
D4	=	C4	-	C3
D5	=	C5	-	C4
D6	=	C2	-	C5
D7	=	C4	-	C5

Tabla 2. Ecuaciones de incógnitas despejadas

INCOGNITAS			OBSERVACIONES		
C2			=	D1	+ C1
C3	-	C2	=	D2	
C3			=	C1	- D3
C4	-	C3	=	D4	
C5	-	C4	=	D5	
C2	-	C5	=	D6	
C4	-	C5	=	D7	

Diferencia de Cota Geopotencial

$$C_B = \frac{\Delta C_A^B - \Delta C_B^A}{2} + C_A$$

$$C_A = 6,1334 \text{ kgal} * m$$

$$\Delta C_A^B = \frac{g_A + g_B}{2} \Delta n_A^B$$

$$\Delta C_B^A = \frac{g_A + g_B}{2} \Delta n_B^A$$

$$C_B - C_A = \frac{\Delta C_A^B - \Delta C_B^A}{2}$$



AJUSTE COTAS GEOPOTENCIALES

Tabla 3. Datos de entrada para el ajuste de cotas geopotenciales

Línea	Nodo Partida	Nodo Llegada	Longitud (km)	Diferencia Cota Geopotencial (u.g.p)	Incertidumbre (m)
L1	C1	C2	220,825	93,0413	0,0594
L2	C2	C3	401,108	-85,8771	0,0801
L3	C3	C1	175,200	-7,1426	0,0529
L4	C3	C4	604,599	216,9456	0,0984
L5	C4	C5	172,320	-213,1221	0,0525
L6	C5	C2	37,470	82,0269	0,0245
L7	C5	C4	313,630	213,0848	0,0708

Diferencia de Cota Geopotencial

$$\Delta C_A^B = \frac{g_A + g_B}{2} \Delta n_A^B$$

$$\Delta C_B^A = \frac{g_A + g_B}{2} \Delta n_B^A$$

$$C_B - C_A = \frac{\Delta C_A^B - \Delta C_B^A}{2}$$

Incertidumbre

$$T = \pm 4mm\sqrt{k}$$



Ministerio
de Defensa
Nacional



Comando Conjunto
de las Fuerzas
Armadas



Ejército
Ecuatoriano



Instituto
Geográfico
Militar

PROCEDIMIENTO

1. Recopilación de la información
2. Generación de una base de datos
3. Cálculo de alturas geométricas (niveladas)
4. Cálculo de cotas geopotenciales
5. Ajuste de cotas geopotenciales
6. Cálculo de alturas físicas

CÁLCULO ALTURAS FÍSICAS

1

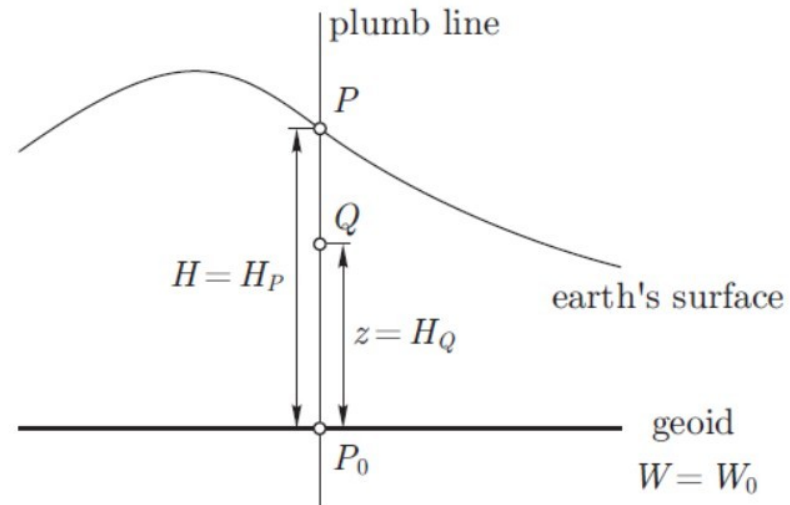
Alturas Ortométricas

$$H = \frac{C}{g + 0,0424H}$$

$$H = \frac{-g + \sqrt{g^2 - 4 \times (0,0424) \times (-C)}}{2 \times (0,0424)}$$

Método Poincaré y Prey

Gravedad medida en P	g
Reducción lámina de Bouguer	$-0,1119(H_p - H_Q)$
Más reducción de aire libre	$0,3086(H_p - H_Q)$
Restauración Lámina de Bouguer	$-0,1119(H_p - H_Q)$
Gravedad de Bouguer	$g_Q = g + 0,0848(H_p - H_Q)$



Fuente: Heiskanen y Moritz, 1985

CÁLCULO ALTURAS FÍSICAS

2

Alturas Normales

$$H^N = \frac{C}{\gamma} \left[1 + (1 + f + m - 2f \sin^2 \varphi) \frac{C}{a\gamma} + \left(\frac{C}{a\gamma} \right)^2 \right]$$

Tabla 4. Parámetros del elipsoide GRS80

Nombre	Parámetro		Valor
	Nombre	Parámetro	
Velocidad angular	Nombre	Parámetro	Valor
	Velocidad angular	ω	$7292115 \times 10^{-11} \text{ rad s}^{-1}$
	Semieje mayor	a	6378137 m
	Semieje menor	b	6356752.3141 m
	Constante gravitacional	GM	$398\ 600.5 \text{ km}^3 \text{ s}^{-2}$
Achatamiento	f	0.00335281068118	
Semieje mayor	Nombre	Parámetro	Valor
	Velocidad angular	ω	$7292115 \times 10^{-11} \text{ rad s}^{-1}$
	Semieje mayor	a	6378137 m
	Semieje menor	b	6356752.3141 m
	Constante gravitacional	GM	$398\ 600.5 \text{ km}^3 \text{ s}^{-2}$
Achatamiento	f	0.00335281068118	
Semieje menor	Nombre	Parámetro	Valor
	Velocidad angular	ω	$7292115 \times 10^{-11} \text{ rad s}^{-1}$
	Semieje mayor	a	6378137 m
	Semieje menor	b	6356752.3141 m
	Constante gravitacional	GM	$398\ 600.5 \text{ km}^3 \text{ s}^{-2}$
Achatamiento	f	0.00335281068118	
Constante gravitacional	Nombre	Parámetro	Valor
	Velocidad angular	ω	$7292115 \times 10^{-11} \text{ rad s}^{-1}$
	Semieje mayor	a	6378137 m
	Semieje menor	b	6356752.3141 m
	Constante gravitacional	GM	$398\ 600.5 \text{ km}^3 \text{ s}^{-2}$
Achatamiento	f	0.00335281068118	
Achatamiento	Nombre	Parámetro	Valor
	Velocidad angular	ω	$7292115 \times 10^{-11} \text{ rad s}^{-1}$
	Semieje mayor	a	6378137 m
	Semieje menor	b	6356752.3141 m
	Constante gravitacional	GM	$398\ 600.5 \text{ km}^3 \text{ s}^{-2}$
Achatamiento	f	0.00335281068118	

$$m = \frac{\omega^2 a^2 b}{GM}$$

Somigliana ,1929

$$\gamma = 9,7803267715 \text{ ms}^{-2} (1 + 0,0052790414 \sin^2 \varphi + 0,0000232718 \sin^4 \varphi + 0,0000001262 \sin^6 \varphi)$$



CÁLCULO ALTURAS FÍSICAS

3

Alturas Dinámicas

$$H^D = \frac{C}{\gamma_{45^\circ}}$$

Somigliana ,1929

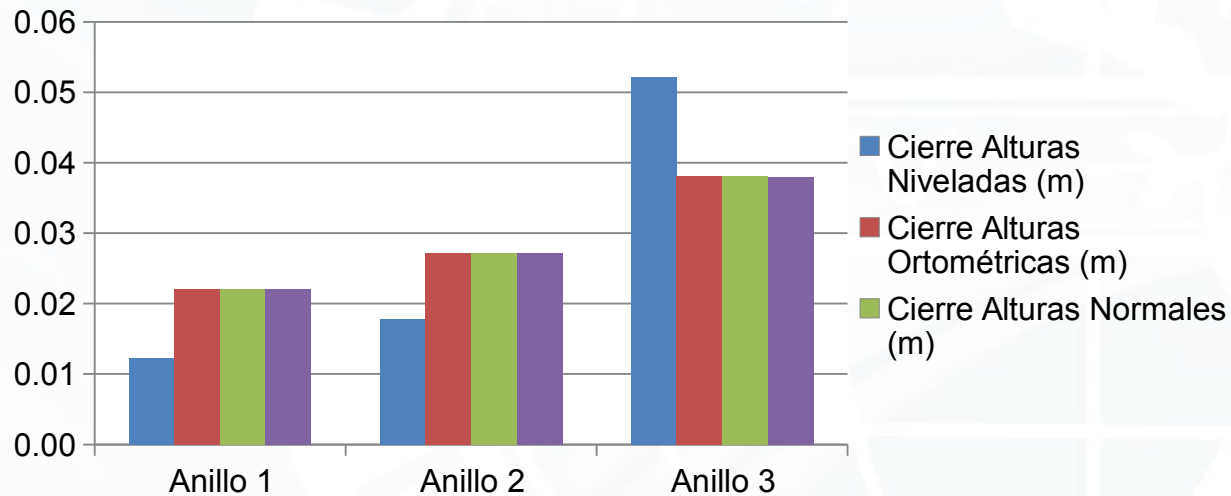
$$\gamma = 9,7803267715 \text{ ms}^{-2} (1 + 0,0052790414 \sin^2 \varphi + 0,0000232718 \sin^4 \varphi + 0,0000001262 \sin^6 \varphi)$$

$$\gamma_{45^\circ} = 980,61992 \text{ gal}$$

RESULTADOS

Tabla 5. Cierre diferentes tipos de alturas

Anillo	Cierre Altura Nivelada (m)	Cierre Altura Ortométrica (m)	Cierre Altura Normal (m)	Cierre Altura Dinámica (m)
Anillo 1	0,0122	0,0221	0,0221	0,0220
Anillo 2	0,0178	0,0272	0,0272	0,0271
Anillo 3	0,0522	0,0381	0,0381	0,0380





RESULTADOS

Tabla 6. Alturas máximas

Punto	Altura Nivelada Ajustada (m)	Altura Ortométrica Ajustada (m)	Altura Normal Ajustada (m)
C303	3495,3046	3496,3301	3495,4529
C304	3602,3876	3603,4583	3602,5532
C305	3523,5679	3524,6017	3523,7218
C209	2,9922	2,9623	2,9625

Tabla 7. Diferencia de alturas máximas

Punto	Diferencia Altura Nivelada-Ortométrica (m)	Diferencia Altura Nivelada-Normal (m)	Diferencia Altura Ortométrica-Normal (m)
C303	-1,0255	-0,1483	0,8772
C304	-1,0707	-0,1656	0,9051
C305	-1,0338	-0,1539	0,8799
C209	0,0299	0,0298	-0,0001



CONCLUSIONES

Los cierres indicados pueden deberse a que en el estudio se logró realizar el cálculo de las alturas físicas con apenas el 48,30% de puntos, porcentaje que representa la cantidad de puntos que cuentan con observaciones de gravedad. La longitud entre puntos con gravedad observada cobra suma importancia si la orografía del terreno es muy abrupta, como es el caso de gran parte de los anillos 1 y 2, que son los que peor resultado muestran.

El único anillo que posee un mejor cierre, obtenido a partir del cálculo de alturas niveladas, que el obtenido con alturas físicas es el anillo que cuenta con una mejor densificación gravimétrica, permitiendo que exista mayor cantidad de datos y lograr corregir los efectos del campo de gravedad de los puntos que forman dicho anillo.

Además, se evidenció que los cierres obtenidos a partir del cálculo de alturas ortométricas y normales son iguales para los tres anillos en estudio. Sin embargo es importante considerar que la diferencia entre alturas ortométricas y normales poseen una magnitud considerable para los puntos ubicados en zonas montañosas. Por este motivo, se puede considerar que los dos tipos de alturas tienen un comportamiento similar únicamente en las zonas planas del estudio.



Ministerio
de **Defensa**
Nacional



Comando Conjunto
de las Fuerzas
Armadas



Ejército
Ecuatoriano



Instituto
Geográfico
Militar

Instituto **Geográfico Militar**
www.igm.gov.ec / www.geoportaligm.gov.ec

GRACIAS