



# Simposio SIRGAS 2015

Noviembre 18 - 20, 2015

## Individualización de Zonas y Rangos de Deformación Horizontal en Chile para Proyectos de Ingeniería de Detalle a partir de la Estandarización de Parámetros Geodésicos y Cartográficos utilizando SIRGAS como Marco de Referencia



Ministerio de  
Obras Públicas

**Héctor Castillo Becerra**

Departamento de Proyectos, Subdepartamento de Ingeniería.

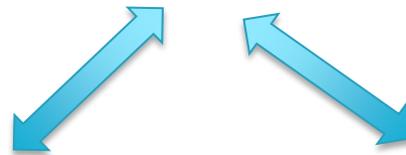
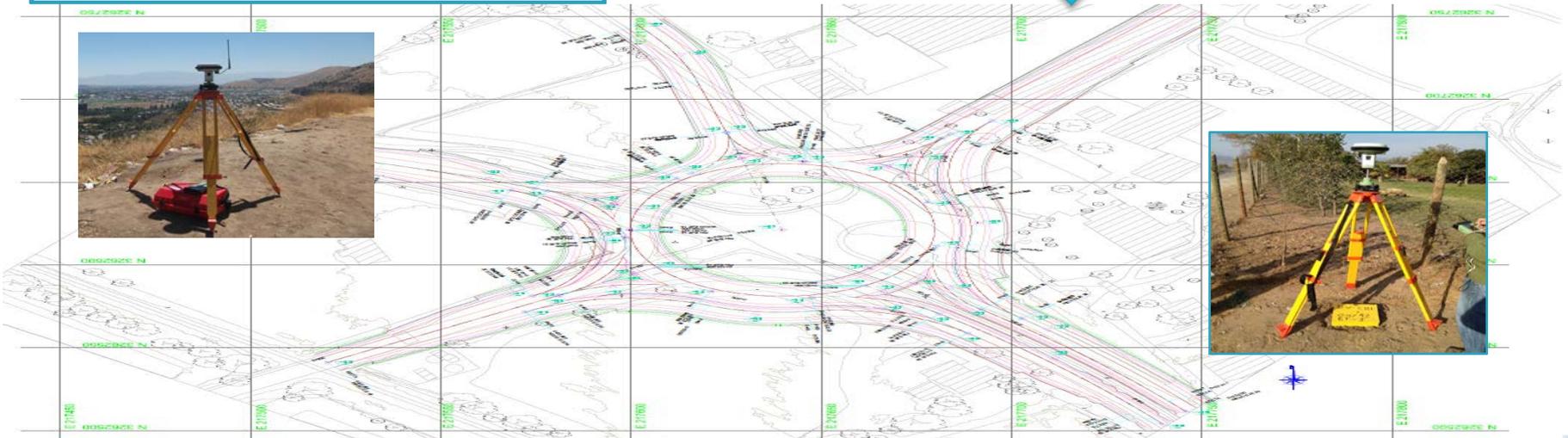
Dirección Regional de Vialidad Región Metropolitana.

Ministerio de Obras Públicas-Chile

*hector.castillo.b @mop.gov.cl*

# CONTEXTUALIZACION

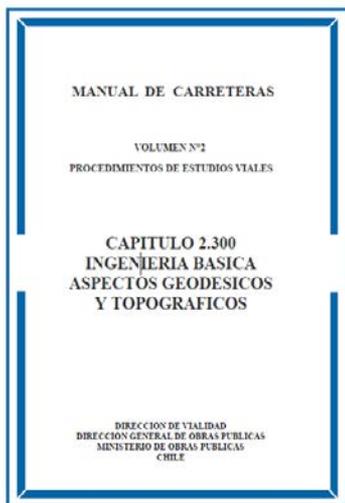
Un diseño y posterior construcción a nivel de ingeniería de detalle escala 1:1000, 1:500 o superior requieren de coordenadas exactas y precisas y además deseablemente vinculadas a un Marco de Referencia.



En Chile actualmente no existe un instructivo explícito ni definiciones puntuales en lo que respecta a la aplicación de coordenadas proyectadas-planas con alcance propio para diseños de ingeniería de detalle referenciados a un sistema geodésico global, moderno compatible con tecnología GNSS de alta precisión.

Para definir la Proyección LTM, se imponen parámetros con los siguientes valores:

- Meridiano Central Local, definido con valor múltiplo de  $\frac{1}{4}$  de grado meridiano.
- Referencia respecto del Ecuador, Falso Norte Local  $FN_L = 7.000.000$  m
- Referencia respecto del  $MC_L$ , Falso Este Local  $FE_L = 200.000$  m.



Con criterios de ordenamiento, se seleccionará la altura del PTL como un múltiplo de 100 dentro de la gama de alturas que le corresponda al proyecto.

Se calculará la corrección debida a la altura del PTL, como un factor de escala específico K, el que queda dado por:

$$K_h = \frac{R + h_{PTL}}{R}$$

- $K_h$ : Factor de escala por efecto de la altura, a la cota  $h_{PTL}$   
R: Radio medio terrestre (6.378.000 m)  
 $h_{PTL}$ : Altura del Plano PTL

Respecto de lo anterior se calculan y se desarrollan planos topográficos locales (PTL) a nivel local dentro del territorio Chileno individualizando zonas con modelos de proyección únicos, minimizando así las deformaciones admisibles para éste tipo de proyectos.

# SITUACION ACTUAL

Indicaciones generalizadas para transformar y relacionar coordenadas desde un sistema geodésico de referencia hacia un plano topográfico local.



Distintos usuarios solicitan sus diseños y las posteriores ejecuciones de obra en coordenadas UTM asociadas a distintos Datum o bien en coordenadas totalmente arbitrarias sin vinculación o georreferenciación alguna



Proyectos que otorgan oportunidad de uso a las coordenadas UTM-Planas reducidas a terreno



Proponer una solución a las incompatibilidades entre los tipos de coordenadas utilizadas en Chile, minimizando los rangos de deformación en distancias horizontales según los requerimientos de cada proyecto en particular.

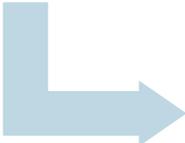
MCL ¿Cu... 4 grado,  
Hpt... ..?

¿DA... 69?  
¿Coordenda... arbitrarias  
Este 5... 000 ... ..?

# PROPUESTA DE TRABAJO

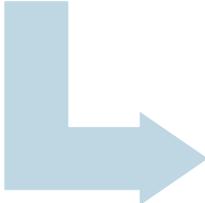
Ambigüedad de coordenadas en proyectos adyacentes o emplazados en una misma zona geográfica situación que en provoca confusiones e incompatibilidades en Chile.

*¿Cual es la Complicación?*



Una proyección Local Transversal Mercator (LTM) por zona claramente delimitada se hace válida como sistema de proyección cartográfico referido a SIRGAS, evitando así múltiples parámetros de transformación y distorsiones entre las distancias existentes en terreno y sus proyectadas.

*.....Solución.....*



Delimitando zonas con parámetros geodésico-cartográficos únicos donde todos los proyectos que se desarrollen en diversos ámbitos y que requieran de la elaboración de ingeniería de detalle puedan lograr compatibilidad y concordancia en sus coordenadas las que estarán vinculadas a un sistema de proyección cartográfico local referido a SIRGAS.

*¿Cómo lo Resolvemos?*

# DESARROLLO DEL ANALISIS

Los sistemas de coordenadas planas permiten representar la superficie del elipsoide sobre un plano, el cual estará asociado a una proyección o cobertura cartográfica.



La representación de una superficie curva sobre un plano no es posible sin distorsión.



La definición y elección de un sistema de proyección cartográfico depende de la utilización del mismo, las representaciones graficas asociadas a la proyección requerida deberán satisfacer una serie de propiedades a partir de ajustes matemáticos o geométricos.



La proyección transversal de mercator es una proyección conforme y se basa en un cilindro secante imaginario como superficie desarrollable, la escala en la proyección TM varía de este a oeste, pero no de norte a sur.



La proyección transversal de mercator en todas sus versiones es, actualmente la más utilizada de todas las proyecciones y aplicable como representación rigurosamente conforme y apropiada para representar países o zonas alargadas en el sentido de los meridianos. Las deformaciones aumentan al separarse del meridiano central.

# Deformación Lineal de la proyección Transversal de Mercator

La Proyección TM es una solución aproximada que resuelve con deformaciones controladas la representación de la superficie terrestre en un plano, por lo tanto se puede conocer el grado de deformación que sufre cada distancia representada, cada distancia sufre una deformación diferente en función de la posición que ocupa en el plano de proyección.

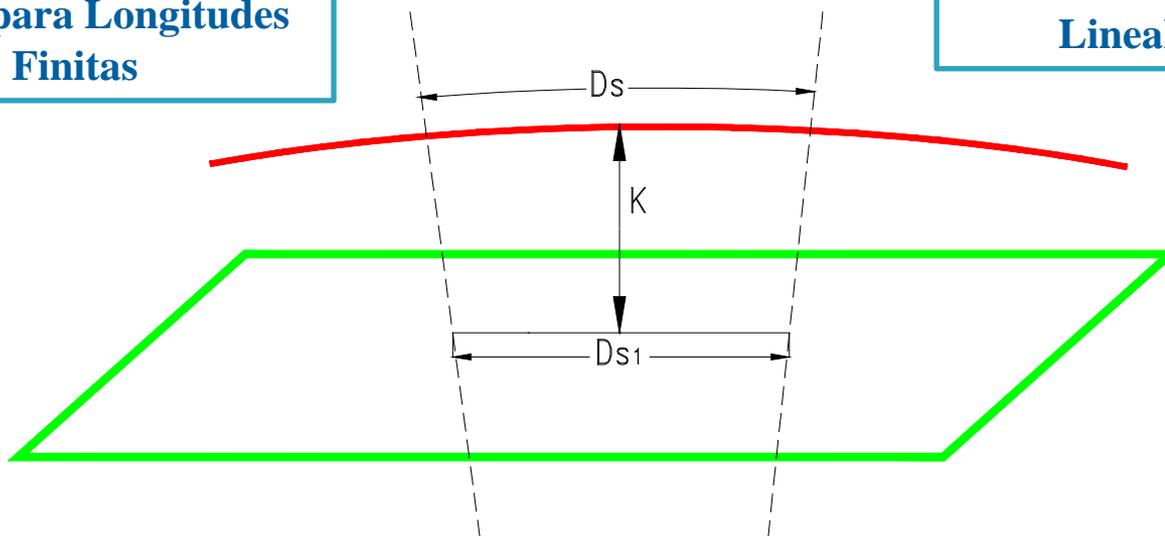
$$K = \frac{D_{s1}}{D_s}$$

Dónde:  $D_{s1}$  es el elemento diferencial sobre el plano de proyección y  $D_s$  elemento diferencial sobre el elipsoide de referencia.

También se puede denotar como módulo de “anamorfosis lineal”

Módulo de Deformación  
Lineal para Longitudes  
Finitas

Módulo de Deformación  
Lineal Puntual



## \* Módulo de Deformación Lineal Puntual

Permite proyectar un diferencial de longitud en torno al punto para el cual se calcule.



Deformaciones expresadas en factor de escala, Factor Cartográfico “K”.



Este factor se puede formular a través de una ecuación generalizada y simplificada que establece la “anamorfosis lineal puntual” de cualquier punto en la dirección del paralelo de ese punto ( $d\varphi = 0$ ).

Ecuación simplificada

$$K = K_0 \left[ 1 + \frac{(\Delta\lambda)^2 (\cos \varphi)^2}{2} \right]$$

Del mismo modo se puede obtener un módulo de deformación lineal como función de las coordenadas planas

$$K = K_0 \left[ 1 + \frac{x^2}{2\rho V} \right]$$

$$\begin{aligned} R_m &= \sqrt{\rho V} \\ R_m &= \sqrt{\rho V} / ( )^2 \\ (R_m)^2 &= \rho V \\ \therefore K &= K_0 \left[ 1 + \frac{x^2}{2\rho V} \right] \end{aligned}$$

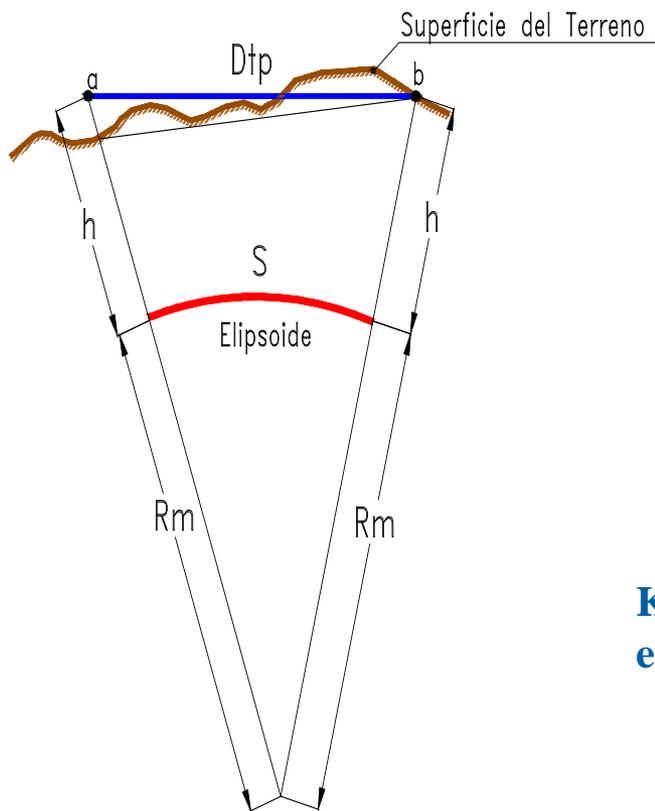
$$\therefore K = K_0 \left[ 1 + \frac{x^2}{2(R_m)^2} \right] \text{ Ecuación simplificada aproximada.}$$

## \* Reducción de la distancia horizontal al elipsoide

Al hacer referencia a la reducción de una distancia entre dos puntos de la superficie terrestre al elipsoide de revolución, lo que se quiere conocer es la longitud geodésica del arco entre las proyecciones de dichos topocentros sobre el elipsoide.



Esta reducción por elevación también se puede expresar como un factor de escala no constante que queda definido en función de la altura en la cual se requiere efectuar la reducción, lo denominaremos Factor Geodésico “Kh”.



$$\frac{D_{tp}}{S} = \frac{R_m + h}{R_m}$$

$$K_h = \frac{R_m + h}{R_m} \quad \text{con } D_{tp} = K_h * S$$

**Kh= Relación de la altura sobre el elipsoide. expresado en precisiones relativas (PPM).**

# \* Deformación Combinada Total (Factor Cartográfico-Factor Geodésico)

La distorsión real que se produce entre las distancias proyectadas sobre el plano de representación cartográfico respecto de las distancias existentes sobre la superficie topográfica se puede expresar como el cociente entre el factor cartográfico y el factor geodésico, denominado factor de escala (deformación) total “Kt”

La deformación lineal es de carácter puntual

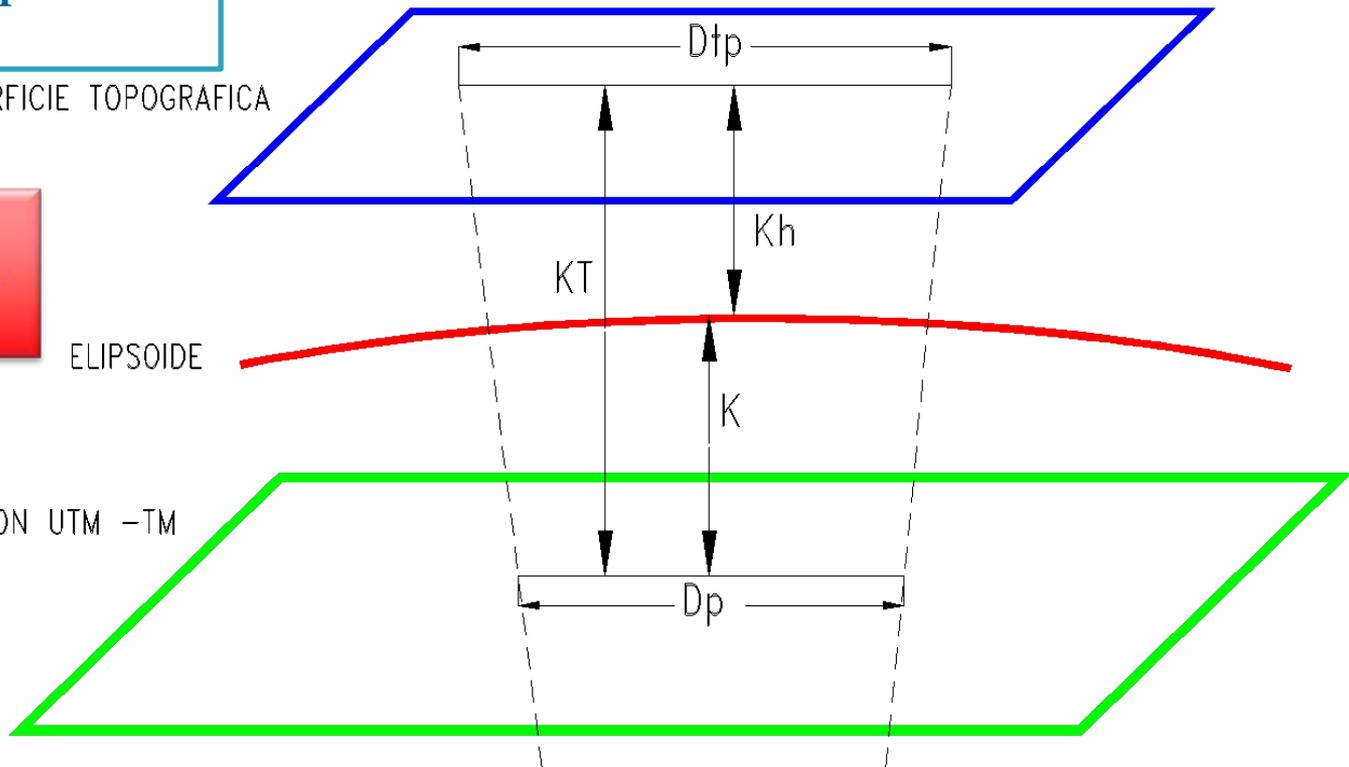
**K= Factor Cartográfico**  
**Kh=Factor Geodésico**

PLANO SUPERFICIE TOPOGRAFICA

$$K_t = \frac{K_h}{K}$$

ELIPSOIDE

PLANO DE PROYECCION UTM -TM



# Integración Tecnología GNSS – Técnicas Topográficas Clásicas para Ingeniería de Detalle



## Determinación de coordenadas GNSS método estático vinculado a la RGN (Chile)

Punto	Coordenadas				
	Geográficas			UTM Huso 19 S	
	Longitud	Latitud	Altura	Norte (m)	Este (m)
1	70° 37' 26,98189 '' W	33° 23' 30,48069 '' S	537,594	6.304.098,171	348.943,681
2	70° 37' 20,16537'' W	33° 23' 11,42090'' S	536,574	6.304.687,984	349.110,654

**Datum: SIRGAS.**

**Elipsoide: GRS-80.**

**Distancia Horizontal UTM**

**(Ds<sub>1</sub>)= 612,992 m.**

**Distancia Elipsoidal**

**(Ds)= 613,065 m.**

**Factor Cartográfico.**

**K= Ds<sub>1</sub>/Ds = 612,992/613,065**

**K= 0,9998809262 Deformación Lineal Puntual  
119,0 PPM**

**K=K<sub>o</sub> \*{1+ [X<sup>2</sup>/(2\*R<sup>2</sup>)]}**

**X= E-EF, Donde:**

**E= Coordenada Este de una posición puntual**

**EF = 500.000**

$$K_1 = 0,9996 * \{1 + [(348.943,681 - 500.000)^2 / (2 * (6.378.000)^2)]\}$$

$$K_1 = 0,99988803528 = 119,6 \text{ PPM}$$

$$K_1 = 0,9996 * \{1 + [(349.110,654 - 500.000)^2 / (2 * (6.378.000)^2)]\}$$

$$K_2 = 0,9998797331 = 120,6 \text{ PPM}$$

**Factor Geodésico.**

$$Kh_1 = (6.378.000 + 537,594) / 6.378.000 = 1,000084289$$

$$Dtp = 1,000084289 * 613,065 = 613,117$$

$$Kh_2 = (6.378.000 + 536,574) / 6.378.000 = 1,000084129$$

$$Dtp = 1,000084129 * 613,065 = 613,117$$

$$Kh_1 = 84,2 \text{ PPM}$$

$$Kh_2 = 84,1 \text{ PPM}$$

**Factor Combinado de Deformación Total. K<sub>t</sub> = K<sub>h</sub>/K**

$$Kt_1 = 1,000084289 / 0,99988803528 = 196,2 \text{ PPM}$$

$$Kt_2 = 1,000084129 / 0,99987973310 = 204,4 \text{ PPM}$$



# Establecimiento de una Proyección Local Transversal

Los sistemas LTM como proyección TM genérica permiten realizar representaciones en coordenadas plano-rectangulares sobre coberturas cartográficas con una deformación lineal mínima.



Su aplicación es efectiva en diseños donde las distancias existentes en terreno deben ser rigurosamente concordantes con sus proyectadas.



Esto se logra haciendo pasar a un altura conveniente el cilindro secante, por lo que el plano de proyección se localiza próximo al nivel del terreno.



Una proyección cartográfica Local Transversal de Mercator se define mediante la selección de cuatro conjuntos de parámetros de carácter cartográfico y geodésico:

- Los parámetros elipsoidales de definición “a” (semi ecuatorial), “f” (achatamiento)
- El origen de la cuadrícula ( $\varphi_0, \lambda_0$ ).
- El Factor de Escala para el meridiano Central ( $\lambda_0$ )
- Las proyecciones este y norte falsas (EF, NF)

# Generación de un Plano Topográfico Local (PTL)

Un sistema de proyección local sobre un plano cartesiano bidimensional a la altitud media donde se efectúa la representación (sobre una porción de la superficie terrestre) al cual le incorporamos normas cartográficas se denomina PTL “cuadrícula ortogonal con fines totalmente topográficos”.



La materialización de las coordenadas plano rectangulares tiene un origen de coordenadas geodésicas conocidas referidas a SIRGAS, por lo tanto todas las coordenadas planas sobre el PTL tendrán su coordenada homóloga en el sistema geodésico.



Para que un PTL pueda ser considerado “Georreferenciado” este debe estar ligado geoméricamente al sistema elipsoidal, en posición, orientación y altura del plano horizontal, generalmente esta ligazón está dada por:



**Posición:** dada las coordenadas geodésicas ( $\varphi_0$ ,  $\lambda_0$ ) del origen del sistema rectangular local ( $X_0$ ,  $Y_0$ ).



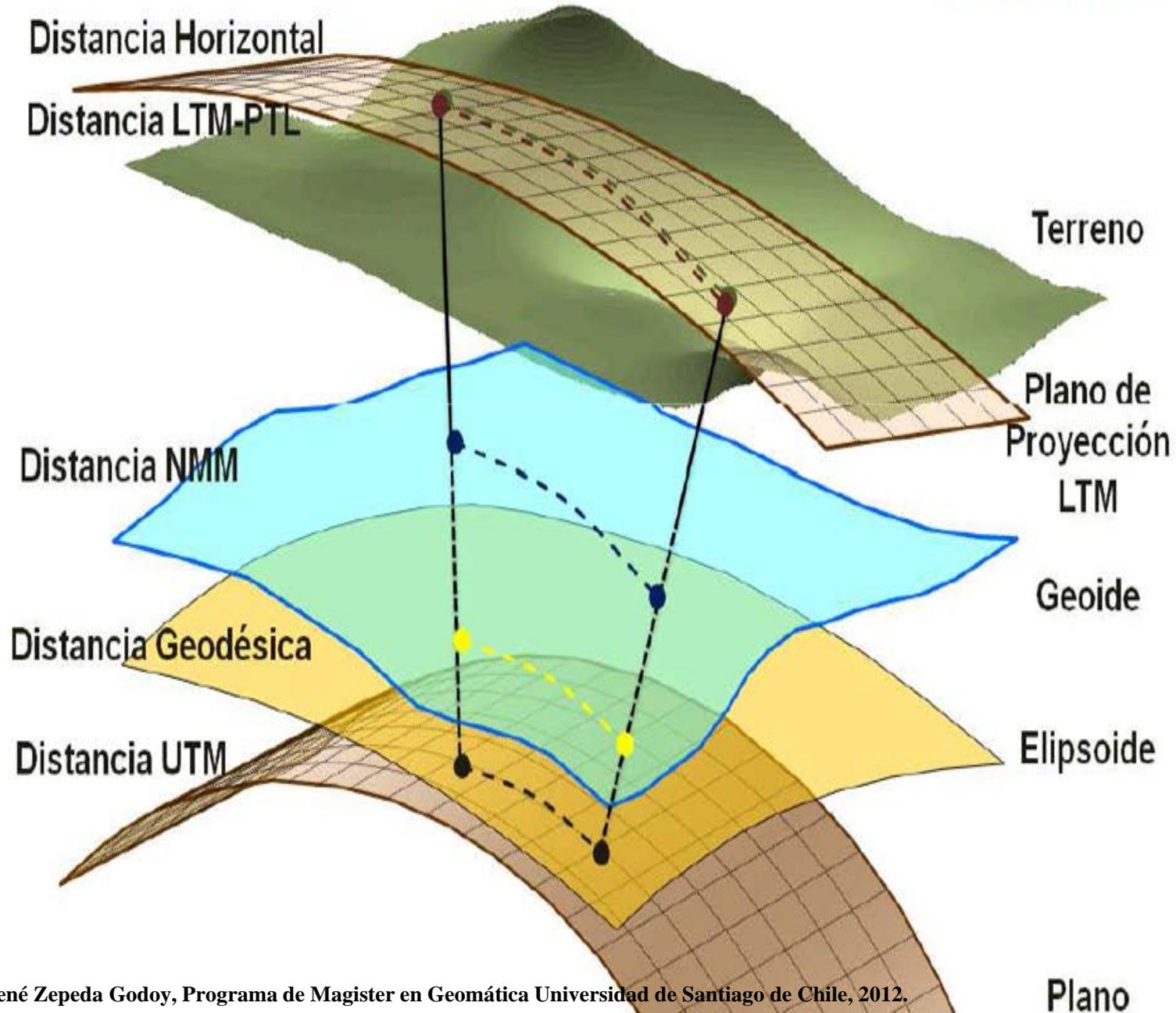
**Orientación:** dada por el azimut geodésico ( $\alpha_0$ ) del eje Y, ordenada del sistema local.



**Altura del plano de referencia:** dada por la altura ( $h_0$ ) del plano de referencia.

# DISTANCIAS

# SUPERFICIES



# Algoritmos de transformación entre sistemas TM y Coordenadas Geodésicas.

Los algoritmos indicados son admitidos para los cálculos y conversión de coordenadas geodésicas a cualquier sistema TM, se necesita imponer los parámetros de cada TM en particular.

a: semi-eje mayor del elipsoide

f: achatamiento del elipsoide

$$b = a * (1 - f) \quad ; \quad c = a^2/b \quad ; \quad e'^2 = (a^2 - b^2)/b^2$$

$$V^2 = 1 + e'^2 * \cos^2\phi \quad M = c / V^3 \quad ; \quad N = c / V$$

$$R\alpha = c / (V + [V^3 - V] * \cos^2\alpha) \quad R = \sqrt{M*N} = c / V^2 \quad ; \quad P = N * \cos\phi$$

Con:

b: semi-eje menor.

e': 2ª excentricidad.

M: radio de curvatura de la sección meridiana.

N: Gran normal.

R $\alpha$ : radio de curvatura de la sección normal de azimut  $\alpha$ .

R: radio medio.

**Transformación de coordenadas TM a Geodésicas a (N, E)  $\rightarrow$  ( $\phi, \lambda$ )**

$$X = (N - NF) / K_0 \quad Y = (N - NF) / K_0$$

$$\phi = \phi_1 + b_2 * Y^2 + b_4 * Y^4 + b_6 * Y^6 + \dots$$

$$\lambda = \lambda_0 + B_1 * Y + B_3 * Y^3 + B_5 * Y^5 + \dots$$

## Transformación de coordenadas Geodésicas a TM $(\varphi, \lambda) \rightarrow (N, E)$

$$N = FN + K_0 * X \quad E = FE + K_0 * Y$$

$$X = B + a_2 * \Delta\lambda^2 + a_4 * \Delta\lambda^4 + a_6 * \Delta\lambda^6 + \dots$$

$$Y = a_1 * \Delta\lambda + a_3 * \Delta\lambda^3 + a_5 * \Delta\lambda^5 + \dots$$

Con:

$(\varphi, \lambda)$ : coordenadas geodésicas del punto por transformar.

$\Delta\lambda$ :  $(\lambda - \lambda_0)$

$\lambda_0$ : longitud del Meridiano Central.

Arco de Meridiano (B):

$$B = A_0 * c * \varphi - A_1 * c * \text{sen } \varphi * \cos \varphi * (1 + A_2 * \text{sen}^2 \varphi + A_4 * \text{sen}^4 \varphi + A_6 * \text{sen}^6 \varphi + A_8 * \text{sen}^8 \varphi)$$

$$A_0 = 1 - 3/4 e'^2 \{ 1 - 15/16 e'^2 [ 1 - 35/36 e'^2 ( 1 - 63/64 e'^2 ( 1 - 99/100 e'^2 ) ) ] \}$$

$$A_1 = 3/4 e'^2 \{ 1 - 25/16 e'^2 [ 1 - 77/60 e'^2 ( 1 - 837/704 e'^2 ( 1 - 2123/1860 e'^2 ) ) ] \}$$

$$A_2 = 5/8 e'^2 \{ 1 - 139/144 e'^2 [ 1 - 1087/1112 e'^2 ( 1 - 513427/521760 e'^2 ) ] \}$$

$$A_4 = 35/72 e'^4 \{ 1 - 125/64 e'^2 [ 1 - 221069/150000 e'^2 ] \}$$

$$A_6 = 105/256 e'^6 \{ 1 - 1179/400 e'^2 \}$$

$$A_8 = 231/640 e'^8$$

$$a_1 = P = N * \cos \varphi$$

$$a_2 = a_1 / 2 * \text{sen } \varphi$$

$$a_3 = a_1 / 6 * (-1 + 2 \cos^2 \varphi + e'^2 * \cos^4 \varphi)$$

$$a_4 = a_2 / 12 * (-1 + 6 \cos^2 \varphi + 9 e'^2 * \cos^4 \varphi + 4 e'^4 * \cos^6 \varphi)$$

$$a_5 = a_1 / 120 * (1 - 20 \cos^2 \varphi + (24 - 58 e'^2) * \cos^4 \varphi + 72 e'^2 * \cos^6 \varphi)$$

$$a_6 = a_2 / 360 * (1 - 60 \cos^2 \varphi + 120 * \cos^4 \varphi)$$

con  $\varphi$  expresado en radianes. (Blachut et al., 1979)

# RANGOS DE DEFORMACION

Deformación en el entendido como la incompatibilidad de las distancias horizontales proyectadas sobre un plano de representación y las distancias horizontales existentes sobre la superficie topografía (Realidad v/s Proyección)

## Deformación Proyección UTM

- ✓ Las distancias de terreno horizontales no son directamente compatibles con las magnitudes proyectadas en el plano UTM, por lo tanto se pueden determinar las deformaciones.
- ✓ La proyección UTM no es aplicable para aquellas representaciones donde la densidad de información es mayor y la precisión de las coordenadas adquiere una mayor relevancia.

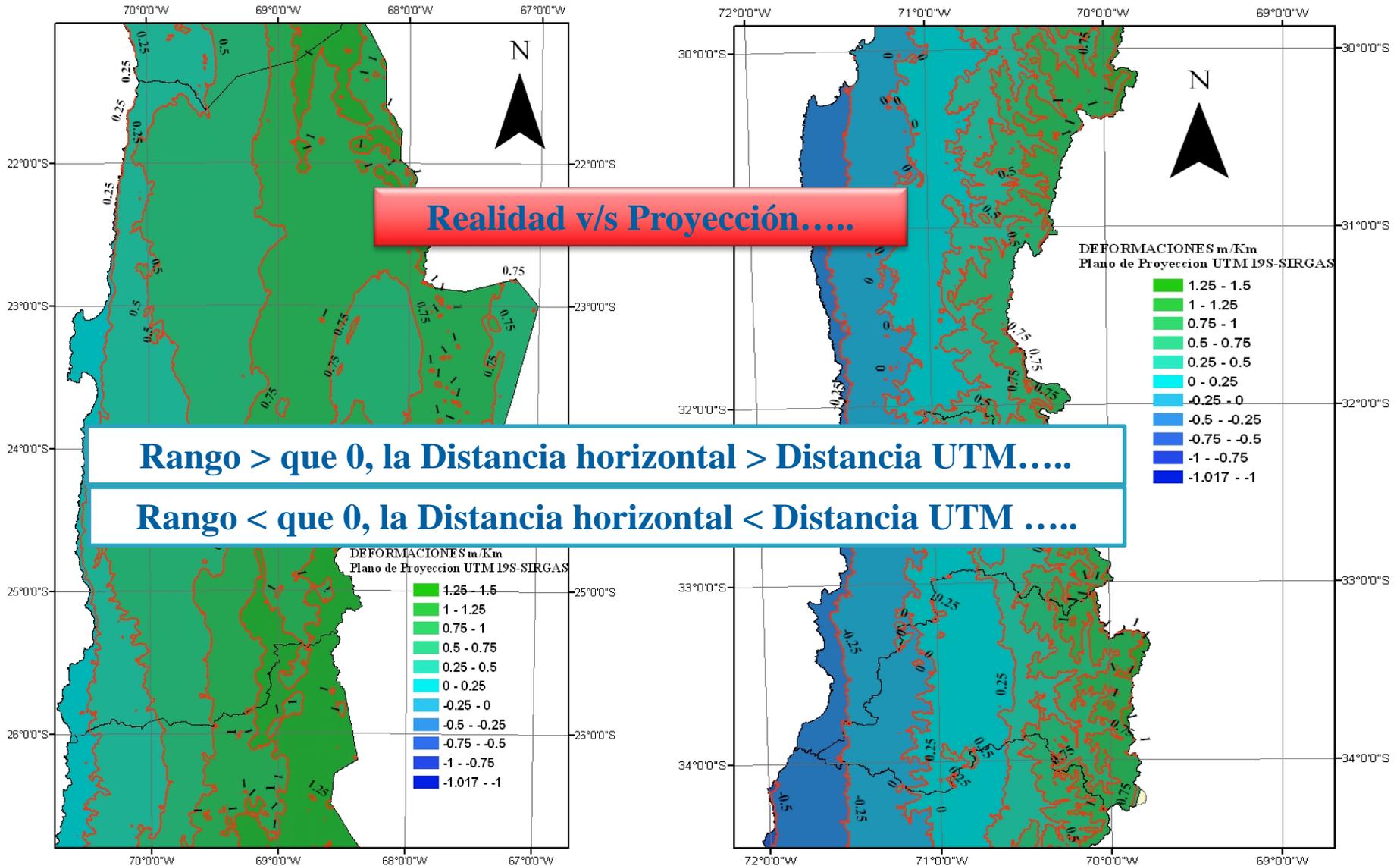
### PROYECCIÓN EN COORDENADAS UTM

#### DATOS UTM

R=	6378000	Constante	Ko=(1-1/2500)	0,9996	Constante	EF=	500.000	Constante
----	---------	-----------	---------------	--------	-----------	-----	---------	-----------

Este	Norte	Altura (h)	X=E-EF	Geodesia	Cartografía	Realidad v/s Proyección	Deformacion		Distancia Sup. Topográfica
				Kh=(R+h)/R	K=Ko*(1+(x*x/2*R*R))	Kt=Kh/K	PPM=(1-Kt)*1000000	m/km=PPM/1000	Dtp =Dp*Kt
290.471	5.953.788	1069,045	-209528,759	1,000167614	1,000139404	1,00002821	28,2061006	0,028	1000,028
245.471	6.333.288	128,004	-254528,759	1,00002007	1,000395978	0,99962424	-375,759369	-0,376	999,624
246.971	6.333.288	272,439	-253028,759	1,000042715	1,000386624	0,99965622	-343,7752985	-0,344	999,656
248.471	6.333.288	126,867	-251528,759	1,000019891	1,000377325	0,9996427	-357,298627	-0,357	999,643
249.971	6.333.288	113,653	-250028,759	1,00001782	1,000368081	0,99964987	-350,1328175	-0,35	999,65
251.471	6.333.288	85,46	-248528,759	1,000013399	1,000358893	0,99965463	-345,3698252	-0,345	999,655
252.971	6.333.288	32,369	-247028,759	1,000005075	1,00034976	0,99965544	-344,564363	-0,345	999,655
254.471	6.333.288	95,714	-245528,759	1,000015007	1,000340682	0,99967444	-325,5644752	-0,326	999,674
255.971	6.333.288	302,398	-244028,759	1,000047413	1,00033166	0,99971585	-284,1529746	-0,284	999,716
257.471	6.333.288	308,185	-242528,759	1,00004832	1,000322693	0,99972572	-274,284256	-0,274	999,726
258.971	6.333.288	329,803	-241028,759	1,000051709	1,000313781	0,99973801	-261,9892701	-0,262	999,738
260.471	6.333.288	340,555	-239528,759	1,000053395	1,000304924	0,99974855	-251,4524731	-0,251	999,749
261.971	6.333.288	385,647	-238028,759	1,000060465	1,000296123	0,99976441	-235,58821	-0,236	999,764

# MAPA TEMATICO DE Kt



## Determinación de proyecciones LTM por Altura

- ✓ Individualización de zonas delimitadas por alturas y en concordancia con las tolerancias admisibles para las escalas usualmente utilizadas para Ingeniería de detalle.
- ✓ Los sectores quedarán emplazados geográficamente dispersos sobre el territorio Chileno, por lo tanto será necesario calcular para cada uno de ellos el respectivo meridiano central local (MCL) vinculado a cada plano de proyección LTM.
- ✓ Definición del rango de cota media a utilizar, tolerancia establecida 5cm/Km.
- ✓ Precisiones relativas que no superen las 50 ppm es decir 1:20.000 , con un factor de escala de 1,000050

$$\Delta Kh = \frac{\Delta h + R_m}{R_m}$$

$$\Delta Kh = \text{Factor Relativo no absoluto}$$

$$(\Delta Kh * R_m) - R_m = \Delta h$$

$$(1,00005 * 6.378.000) - 6.378.000 = \Delta h$$

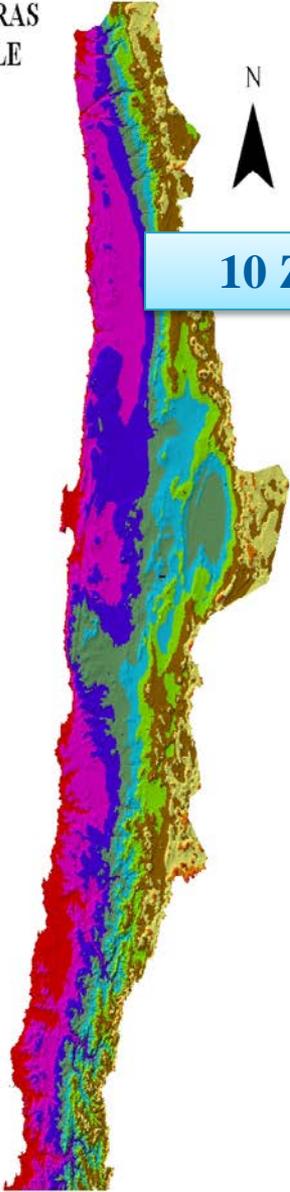
$$\Delta h = 318,9 \quad H_{ptl} = 310 \text{ m}$$

- ✓ Para la definición del desnivel máximo del terreno respecto del Plano Topográfico Local en conformidad con la tolerancia establecida como criterio para proyectos de ingeniería de detalle, se adopta como valor desnivel máximo +/- 310 m, es decir, proyección LTM que superen los 620 de distancia vertical.

# Determinación de proyecciones LTM e Individualización de zonas



DEFINICION POR ALTURAS  
ZONA NORTE DE CHILE

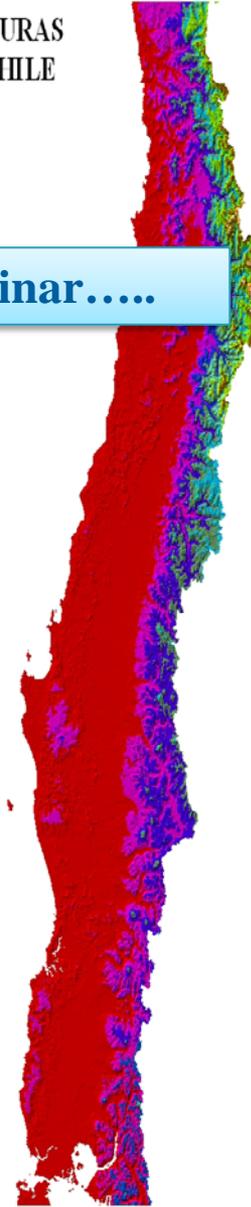


RANGOS DE ALTURA

ALTITUD EN METROS

6200 - 6820
5580 - 6200
4960 - 5580
4340 - 4960
3720 - 4340
3100 - 3720
2480 - 3100
1860 - 2480
1240 - 1860
620 - 1240
0.019 - 620

DEFINICION POR ALTURAS  
ZONA CENTRO DE CHILE



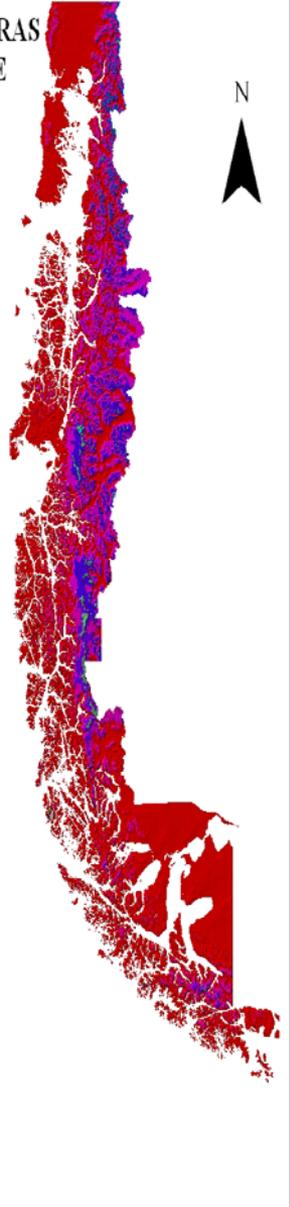
RANGOS DE ALTURA

ALTITUD EN METROS

6200 - 6820
5580 - 6200
4960 - 5580
4340 - 4960
3720 - 4340
3100 - 3720
2480 - 3100
1860 - 2480
1240 - 1860
620 - 1240
0.019 - 620

10 Zonas ....Preliminar.....

DEFINICION POR ALTURAS  
ZONA SUR DE CHILE



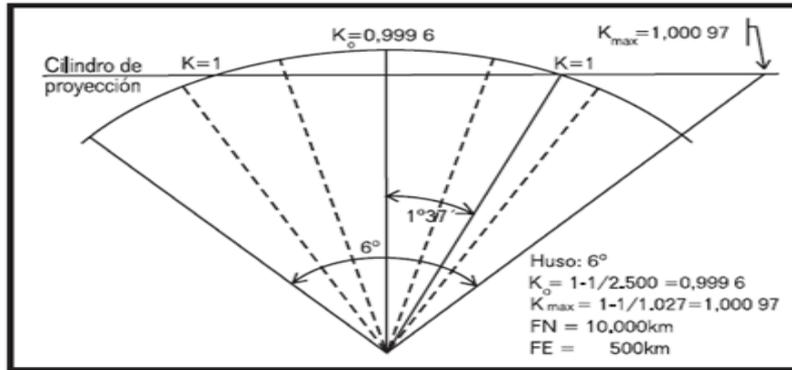
RANGOS DE ALTURA

ALTITUD EN METROS

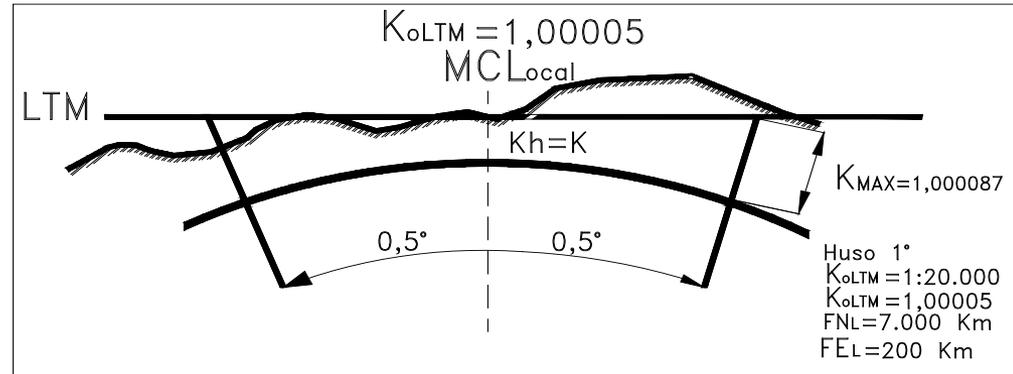
6200 - 6820
5580 - 6200
4960 - 5580
4340 - 4960
3720 - 4340
3100 - 3720
2480 - 3100
1860 - 2480
1240 - 1860
620 - 1240
0.019 - 620

# Determinación de Proyecciones LTM-Ancho de Huso

## Proyección UTM



## Proyección LTM



Se define un ancho de huso de  $1^{\circ}$  para alcanzar un  $K$  máximo de 1,000087

PROYECCION  
LTM PUNTUAL

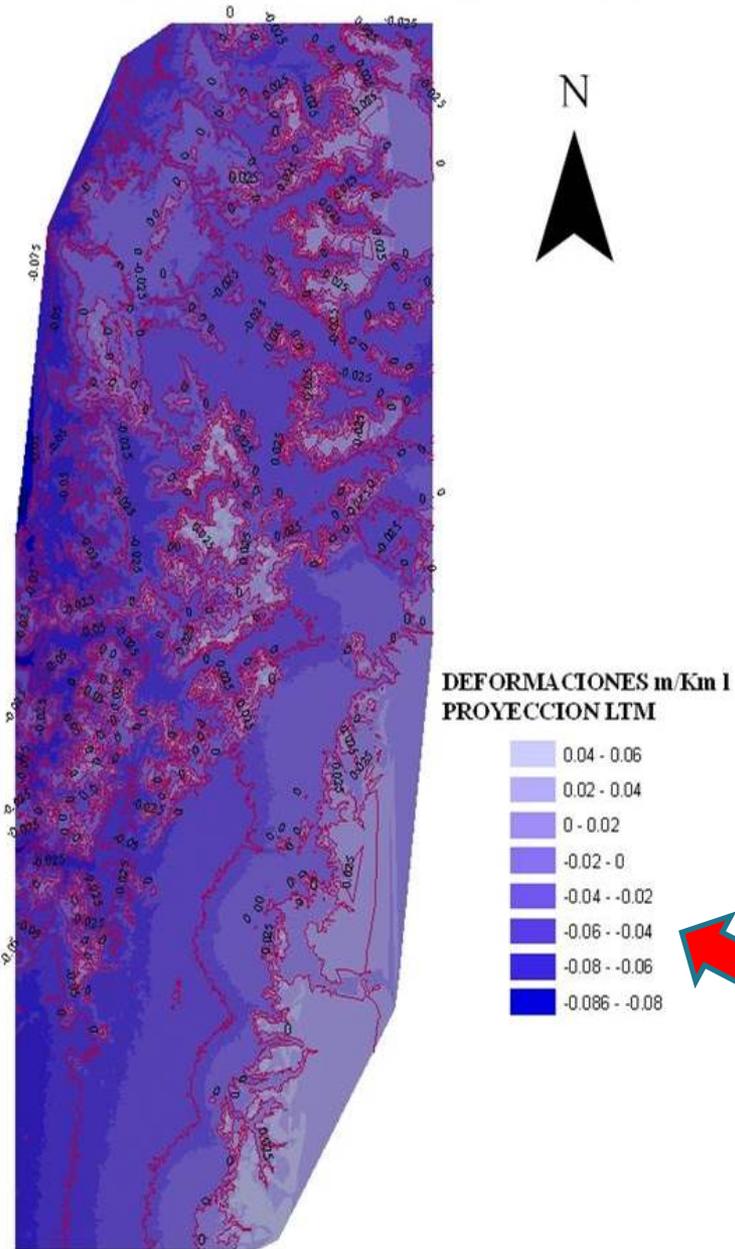
CARTOGRAFICO

- ✓ Meridiano Central Local (MCL)
- ✓ El origen de la cuadrícula ( $\varphi_0, \lambda_0$ )
- ✓ El Factor de Escala para el meridiano Central ( $\lambda_0$ )
- ✓ Las proyecciones EF y NF.

GEODESICO

- ✓ Los parámetros elipsoidales de definición – SIRGAS
- ✓ HPTL

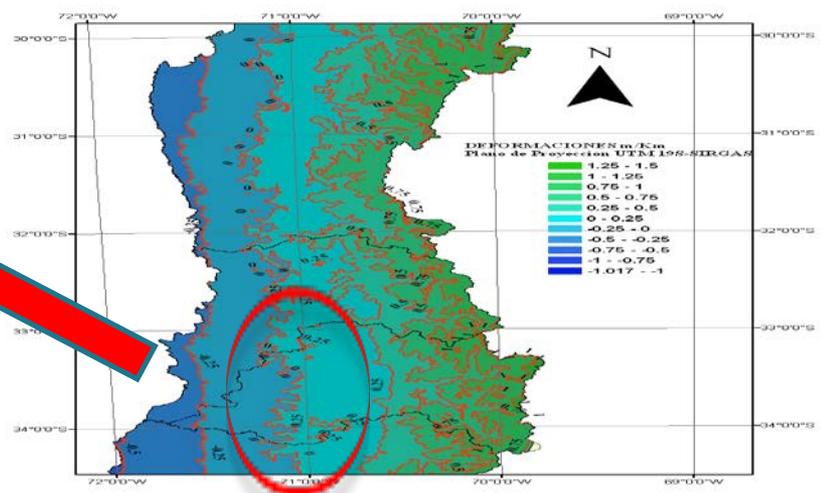
# PROYECCION LTM-ZONA VI-a RANGOS DE DEFORMACION



## Determinación Parámetros Específicos

Marco de Referencia	SIRGAS
✓ MCL	-71°
✓ Hptl	310 m.
✓ Ancho del Huso	1°
✓ $K_0$ LTM	1,00005
✓ $EF_L$	200.000 m
✓ $NFL$	7.000.000 m

✓ ESTANDARIZACION



# CONSIDERACIONES FINALES

\* Es posible realizar proyectos de ingeniería de detalle en coordenadas geográficas referidas a las Zonas de Referencia Geográficas logrando compatibilidad y concordancia.

\* Definición preliminar de 20 Zonas de Referencia Geográficas, una de ellas con su proyección LTM particular.

\* Verificación geométrica superior a 1:40.000 entre la distancia horizontal medida en superficie topográfica y la distancia PTL-LTM.

Al estandarizar datos se eliminan las incompatibilidades en coordenadas y su aplicación es válida en cualquier ámbito, integrando éstos datos con otras disciplinas.

✓ ...GEORREFERENCIACION....

**.....Muchas Gracias por su  
Atención.....**

