



ESTUDIO PARA LA NIVELACIÓN DE LA PARCELA SIETE DEL CENTRO DE ENSEÑANZA AGROPECUARIA DE LA FES- CUAUTITLÁN

Karen Ivonne Hidalgo Téllez¹; Homero Alonso Sánchez¹

^{1*} Ingeniería Agrícola de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán-UNAM. Carretera Cuautitlán-Teoloyucan km 2.5, Col. San Sebastián Xhala, Cuautitlán Izcalli, Estado de México, México. CP. 54700.

karen.hgo.tz gmail.com – 55 60 91 30 34 (*autor de correspondencia)

Resumen

La nivelación de terrenos agrícolas es una práctica física de preparación que permite completar y optimizar el diseño de los sistemas de riego por gravedad pues es directamente en la parcela donde se refleja el uso y manejo racional del agua. Por esta razón, la uniformidad del riego por gravedad está en función de la proyección y ejecución de la nivelación de tierras. Se realizó el estudio para la proyección de la nivelación de la parcela siete de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, con la finalidad de contribuir al uso eficiente del agua de riego. Para ello, se ejecutó el cálculo de la nivelación de tierras de la parcela, donde se obtuvo la ecuación de plano proyecto que minimice el movimiento de tierras y posteriormente se calcularon los espesores de cortes y rellenos. Dicho cálculo se realizó con datos del levantamiento topográfico por radiaciones de 2019 y 2021 para comparar la modificación de las pendientes. Para establecer una cuadrícula regular se utilizó el programa SINIVET 5.0; se generaron los cálculos de la proyección definiendo las cotas del terreno natural y las cotas ajustadas a la nivelación y al coeficiente de abundamiento. Para ejecutar la nivelación en la parcela, se estimó que el costo del movimiento de tierras con base en el método de la adición para cálculo de volumen es de \$21,667.02, y de \$16,111.80 para el método de los cuatro vértices, acorde al costo actual utilizado en los distritos de riego del centro del país.

Palabras claves: mínimos cuadrados, riego y drenaje, sostenibilidad



Introducción

Uno de los principales problemas que enfrentan los productores agrícolas en las áreas de riego por gravedad en México y en el mundo, es la baja eficiencia y deficiente uniformidad con que se aplica el agua (Hernández y Sánchez, 2007). La crisis del agua ha permeado en el ámbito agrícola, donde el riego parcelario demanda una tecnificación en diferentes niveles; sin embargo, los avances han sido limitados (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2016).

La nivelación de terrenos agrícolas impacta de forma importante en la mejora del desempeño del riego parcelario en el riego por gravedad en cuanto a la eficiencia de aplicación, la uniformidad y distribución del agua, incluyendo la reducción de tiempo de riego (Prado y Hernández, 2014). El tema de nivelación de tierras agrícolas sigue siendo de alto impacto en el rescate de volúmenes de agua de riego, que sin esta práctica de mejoramiento físico, se perdería irremediablemente entre un 20 y 30%; es por ello que el mejoramiento territorial de los terrenos agrícolas, mediante los trabajos de nivelación, es una práctica indispensable y, quizá la más impactante para lograr el uso racional del agua en el riego por gravedad (Hernández y Sánchez, 2007).

La nivelación de tierras pretende solucionar problemas de baja eficiencia de aplicación y deficiente uniformidad del riego ocasionados por irregularidades topográficas (Navarro, 2018); además permite que el agua de riego se aplique perfecta y regularmente en toda su superficie, o bien la de lluvia escurra adecuadamente sin dar lugar a procesos erosivos indeseables (Franquet y Querol, 2010).

En México, el riego por gravedad, ocasiona grandes pérdidas de agua en su manejo a nivel parcelario y eficiencias de riego muy bajas (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2020). Para lograr un riego eficiente con un adecuado drenaje parcelario, y generar mayor rendimiento de los cultivos, se recurre a la nivelación de tierras. Corregir el desnivel de las áreas de riego es un paso imprescindible para el crecimiento productivo, lo que a su vez contribuye al ahorro del agua que se consume durante el riego (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2020). Teniendo en cuenta la disminución de la disponibilidad de agua de riego y la productividad de los cultivos, así como el aumento de la demanda de alimentos, se requiere de estudios que permitan la identificación y la adopción rápida de tecnologías para una gestión eficiente del agua (Sánchez *et al.*, 2020). Debido a que el diseño del riego por gravedad está concebido estrictamente en la parcela, un proyecto de nivelación permite mejorar las condiciones de manejo para lograr una mayor producción de los cultivos y hacer un uso racional del agua en la irrigación agrícola.

Con la finalidad de optimizar el manejo del riego por gravedad, se realizó la proyección de la nivelación de tierras de una parcela demostrativa para contribuir a mejorar el uso del agua de riego.



Materiales y Métodos

El área de producción de la Unidad Agrícola del Centro de Enseñanza Agropecuaria (CEA), perteneciente a la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (FES-C) en el Estado de México (se encuentra en las coordenadas 19°41'39" de latitud y 99°11'33" de longitud, a 2255 msnm; con temperatura media anual de 21°C y precipitación media anual de 599 mm), se encarga de producir forraje para abastecer los requerimientos del CEA. La superficie con derecho a riego de la Facultad es de aproximadamente 60 hectáreas, en la figura de usuario del agua pertenece al Distrito de Riego 073 de la Concepción, que tiene como fuentes de abastecimiento la presa Guadalupe y presa la Concepción, éstas se alimentan del escurrimiento superficial de sus cuencas. La red de riego se compone de infraestructura hidroagrícola para distribuir el agua a las parcelas de producción. Actualmente, se conoce que el área de producción del CEA presenta desniveles y pendientes encontradas, además de las visibles necesidades de rehabilitación de la infraestructura.

La nivelación de tierras agrícolas ocupa el cumplimiento de algunos requerimientos mínimos para iniciar con un proyecto ejecutivo, por esa razón se deben verificar las condiciones de viabilidad que indica la literatura y la praxis para reducir el riesgo de generar una propuesta sin sustento técnico y que raye en la baja sustentabilidad. En el campo es necesario realizar el levantamiento de los rasgos terrestres que permitan caracterizar geométricamente el área de proyecto, por su parte en gabinete se siguen también una serie de pasos para obtener un proyecto de nivelación de tierras; para ello, se siguieron los siguientes pasos generales donde se incluyen los materiales a utilizar:

- Se realizó la planeación de los trabajos utilizando información cartográfica digital como las cartas topográficas escala 1:50,000 e imágenes de satélite de GoogleEarth que circunscriben el área de la Unidad Agrícola del CEA.
- Con la planeación de gabinete se realizó un recorrido de campo para organizar los trabajos topográficos.
- En los dos escenarios (2019 y 2021), se obtuvieron las condiciones de la superficie de la parcela siete de la Unidad Agrícola del CEA, para ello se realizó un levantamiento topográfico con la estación total Leica TC 307. Se estacionó y orientó desde un punto de control donde se dominó toda la superficie y por medio del método de radiaciones se realizaron las mediciones para que el instrumento calculara las coordenadas de los Puntos de Configuración y Detalle tomando como base un Punto de Control y Apoyo (PCA). Se simuló una cuadrícula de aproximadamente 30 pasos en la dirección este-oeste y norte-sur con la finalidad de llevar un orden sistemático.

Con la información de campo se procedió a realizar el trabajo de gabinete para el proyecto de nivelación de la que se describe en los siguientes apartados.

A. Obtención del plano proyecto



- Para el procesamiento de los datos de la estación total, se exportaron al módulo CivilCAD de AutoCAD, donde se realizó la triangulación de los datos para obtener las curvas de nivel de las condiciones actuales de la parcela. Se utilizó el programa SINNET 5.0 para el proyecto de nivelación de tierras al cual se le ingresó la información de los PCA y PCD para obtener la interpolación de las coordenadas y las nuevas cotas de la cuadrícula regular.
 - Con las cotas de la cuadrícula se aplicó el método directo de mínimos cuadrados para obtener la ecuación del plano proyecto. Se evaluó si las pendientes obtenidas en la ecuación del plano proyecto se aceptaban o se modificaban en función a la entrada y salida del agua de riego en la parcela. A partir de aplicar la ecuación del plano proyecto, se calcularon las cotas para minimizar el movimiento de tierra, y se realizó la comparación con las cotas del terreno regular para conocer los espesores de corte y relleno.
- B. Ajuste del plano proyecto
- Se utilizó el coeficiente de Trueba correspondiente para la textura del suelo de la parcela, para el ajuste de la ecuación del plano proyecto para minimizar el fenómeno de abundamiento, donde los volúmenes de corte deben ser mayores a los de relleno. Posteriormente, la ecuación ajustada se aplicó a las coordenadas de la cuadrícula regular.
- C. Cálculo del volumen de corte y relleno
- Empleando como insumo los espesores de corte y relleno ajustados, se calcularon los volúmenes. Se determinaron los volúmenes utilizando dos métodos diferentes: método de la adición y el método de los cuatro vértices.
 - Los valores obtenidos posterior a realizar el ajuste del coeficiente de abundamiento al plano proyecto, fueron procesados en el módulo de CivilCAD de AutoCAD para esquematizar la triangulación de la cuadrícula regular y obtener las curvas de nivel del proyecto de nivelación de tierras.
 - Finalmente se estimó el costo que generará el movimiento de tierras a partir de los volúmenes calculados con los dos métodos aplicados.

Con los resultados de los parámetros para nivelación; ecuación, pendientes, desplazamiento del plano, relación corte relleno, volúmenes de movimiento de tierra y costo, se realizó la comparación de dos tiempos diferentes: Escenario 2019 y Escenario 2021; por lo cual, ésta metodología se aplicó en ambos escenarios.

Resultados y Discusión

Cálculo para la nivelación de tierras del Escenario 2019

Con un levantamiento topográfico por radiaciones se obtuvieron coordenadas convenientemente en el primer cuadrante topográfico del plano cartesiano; para

evitar el número elevado de dígitos en los cálculos no se tomaron las coordenadas de la proyección UTM, en cambio, la coordenada Z fue la que reporta el GPS donde la elevación es con respecto al nivel del mar. Los ejes se definieron de acuerdo a un plano topográfico donde el eje “y” coincide con la meridiana magnética y el “x” en la dirección oeste-este.

Con las coordenadas como insumo se obtuvo el plano con las curvas de nivel que se observan en la Figura 1. Se utilizaron las herramientas del Civil CAD para generar curvas equidistantes cada 5 cm, esto con el fin de identificar los cambios de relieve que obligan la dirección y trazo del riego. El riego normalmente se aplica con el trazo de los surcos en la dirección sur a norte, sin embargo, los regadores de la parcela han manifestado la dificultad para regar señalando que el agua se cuelga en la segunda mitad del surco. Esta condición es evidente en la Figura 1, y en la práctica causa desbordamiento y evita la llegada del agua al final (pie de parcela).

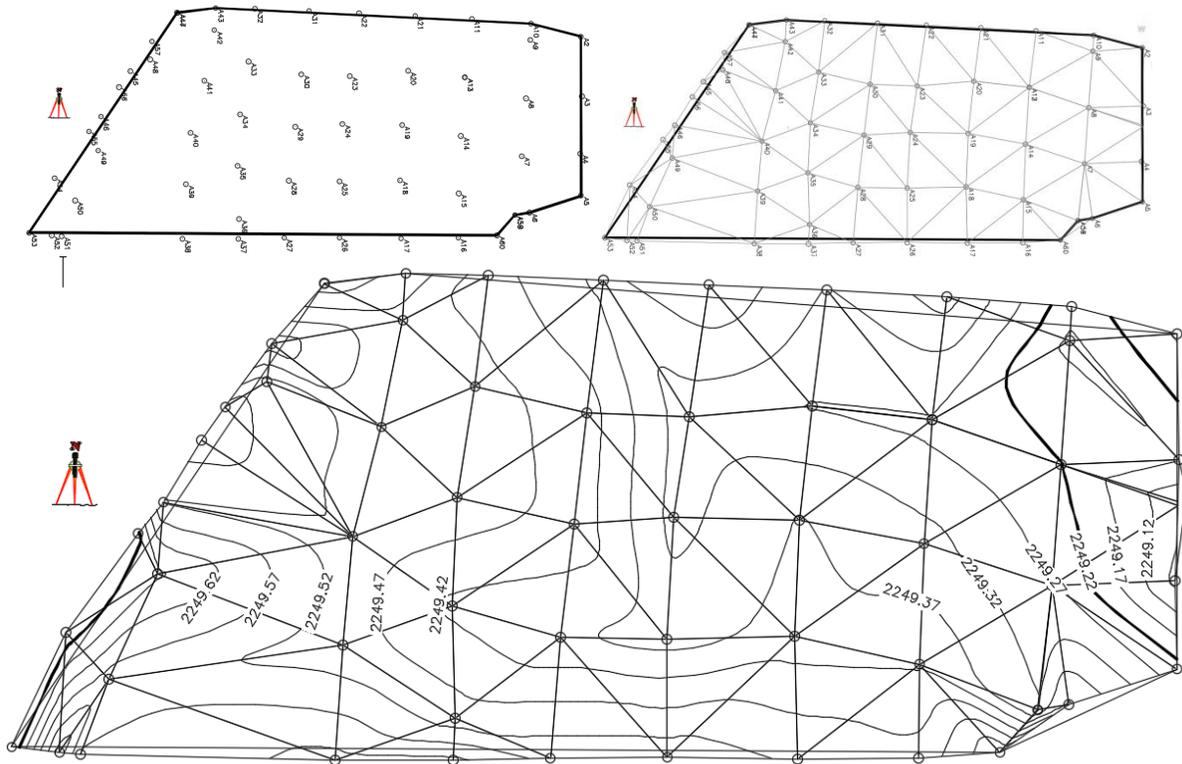


Figura 1. Configuración topográfica de la parcela siete a partir del levantamiento con radiaciones. Escenario 2019.

Obtención del plano proyectado

Tomando como insumo los datos del levantamiento para el Escenario 2019 se aplicó el método de Mínimos Cuadrados para obtener la ecuación (1) del plano proyectado:

$$\hat{Z}_{ij} = A + BX_i + CY_j \quad (1)$$



Donde:

\hat{Z}_{ij} = Cota sobre el plano proyecto en un punto de coordenadas X_i, Y_j

B, C = Pendientes en los sentidos de los ejes x e y , respectivamente (constantes)

A = Constante que geoméricamente representa la cota sobre el plano proyecto, en el origen del sistema de coordenadas.

i = 1, 2, 3, ..., n (Núm. de hileras)

j = 1, 2, 3, ..., m (Núm. de columnas)

La solución por determinantes de las ecuaciones normales con número total de vértices de la cuadrícula fue $N = 59$. Resultando los cocientes:

$$A = \frac{D_A}{D} = \frac{6,937,540,960,047,100}{3,082,196,390,618} = 2,250.843 \text{ m}$$

$$B = \frac{D_B}{D} = \frac{-4,155,043,936}{3,082,196,390,618} = -0.001348 \text{ m}$$

$$C = \frac{D_C}{D} = \frac{-2,418,680,704}{3,082,196,390,618} = -0.000785 \text{ m}$$

Por lo tanto, la ecuación del plano proyecto del Escenario 2019 es:

$$\hat{Z}_{ij} = 2,250.843 + (-0.001348)X_i + (-0.000785)Y_j$$

El valor de la ordenada al origen parece sobrepasar el rango de elevaciones del terreno natural, sin embargo, este valor corresponde a la coordenada del origen ($x=0, y=0$). Los coeficientes de X_i e Y_j son las pendientes naturales que generan el mínimo movimiento de tierras, los valores negativos son congruentes con las condiciones de la parcela debido a que la pendiente es descendente de oeste a este (dirección del eje X positivo) y también de sur a norte (dirección positiva del eje Y). En la parcela siete, la regadera se traza en dirección del eje X y el trazo del riego corresponde con el eje Y ; las pendientes ($B = -0.001348$ y $C = -0.000785$) son apropiadas para el diseño del riego por gravedad posterior a la nivelación.

Para calcular los volúmenes se necesita una cuadrícula regular, por lo cual, los datos x_i, y_j, z_{ij} del levantamiento por radiaciones y las coordenadas de los vértices de la poligonal del terreno con valores X_v, Y_v , se procesaron en el programa SINIVET 5.0 para obtener únicamente de éste, una cuadrícula homogénea de tamaño 20×20 , la cual se generó a partir de los límites del terreno y la interpolación de las coordenadas para obtener los nuevos valores x_i, y_j , donde $L = 20 \text{ m}$. En cada nodo de la cuadrícula (i, j) , el programa interpola el valor Z_{ij} del terreno natural ($Z_{ij} (TN)$). En cada nodo



también se aplicó la ecuación del plano proyecto $\hat{Z}_{ij} = 2,250.843 + (-0.001348)X_i + (-0.000785)Y_j$ que representa la nueva elevación \hat{Z}_{ij} para el mínimo movimiento de tierras. Con estos resultados, se calcularon los espesores de corte y relleno, donde se obtuvieron los valores $\sum C_{ij} = 1.463 \text{ m}$ y $R_{ij} = 1.191 \text{ m}$, con número de rellenos $N_r = 35$ y número de cortes $N_c = 41$; por lo tanto, la relación corte/relleno resulta $Q = 1.2$.

Ajuste del plano proyecto

Los espesores de corte y relleno se utilizaron como insumo para calcular el desplazamiento vertical del plano proyecto Δ , a partir de los valores propuestos por Trueba recomendados para la relación corte/relleno en los trabajos de nivelación de tierras y de la textura franco arcillosa del suelo, se le asignó el valor deseado de 1.3 a Q .

$$\Delta = \frac{Q \sum_{j=1}^{N_r} R_j - \sum_{i=1}^{N_c} C_i}{Q N_r + N_c} = \frac{1.3 \cdot 1.191 - 1.463}{1.3 \cdot 35 + 41} = -0.001 \quad (2)$$

El ajuste de la ordenada al origen del plano proyecto es $\Delta = 0.001$ que indica un desplazamiento vertical de 1 mm. Por lo tanto la ecuación para calcular \hat{Z}_{ij} ajustada a Δ es $\hat{Z}_{ij} = 2,250.842 + (-0.001348)X_i + (-0.000785)Y_j$. Nuevamente se calcularon los espesores de corte y relleno, donde $C_{ij} = 1.503 \text{ m}$ y $R_{ij} = 1.158 \text{ m}$; la relación corte/relleno resulta $Q = 1.3$ que coincide con el valor deseado.

Cálculo de volúmenes de corte y relleno

Con los espesores ajustados se obtuvo el volumen de corte y relleno donde se utilizaron las ecuaciones para el método de la adición (3) y (4) según corte o relleno respectivamente. Con el método de la adición el volumen total de corte resulta 601.376 m^3 y de relleno 463.391 m^3 , estos valores coinciden con la relación $Q = 1.3$.

$$V_c = L^2 \sum_{i=1}^{N_c} C_i \quad (3)$$

$$V_r = L^2 \sum_{j=1}^{N_r} |R_j| \quad (4)$$

En las que:

- V_c = Volumen total de corte, en m^3 ;
- C_i = Espesor de corte i -ésimo, en m;
- i = 1, 2, 3, ..., N_c = Número de espesores de corte;
- V_r = Volumen total de relleno, en m^3 ;
- R_j = Espesor de relleno j -ésimo, en m; y



$$j = 1, 2, 3, \dots, Nr = \text{Número de espesores de relleno.}$$

El Cuadro 1, muestra la forma de la cuadrícula regular que genera con interpolación el programa SINIVET 5.0, la cual resultó de 15 *columnas* \times 6 *filas* y 76 vértices. En cada celda, que indica un nodo, se muestra de arriba hacia abajo, la elevación del terreno natural, la elevación del plano proyecto ajustado y el valor del corte o relleno según el signo + (corte) y - (relleno). También se indican las coordenadas rectangulares que constituyen la información para el proyecto ejecutivo de nivelación de tierras. Con estos valores se trabaja en campo generando una cuadrícula con estacas en las que se anota el corte o relleno como guía para el operador de la escropa o, de otro modo, se indican los puntos de control y las pendientes deseadas en el equipo láser o GPS.

Cuadro 1. Elevaciones y espesores de corte y relleno para el proyecto ejecutivo de nivelación de tierras del Escenario 2019.

		559.274	579.274	599.274	619.274	639.274	659.274	679.274	699.274	719.274	739.274	759.274	779.274	799.274	819.274	839.274		
\hat{Z}_i (TN)	1	300.927				2249.80	2249.77	2249.72	2249.67	2249.65	2249.63	2249.59	2249.61	2249.6	2249.48	2249.49		
			\hat{Z}_i ajustada				2249.744	2249.717	2249.690	2249.663	2249.636	2249.610	2249.583	2249.583	2249.529	2249.502	2249.475	
			corte o relleno				0.056	0.051	0.034	0.011	0.015	0.017	0.003	0.052	0.067	-0.024	0.019	
\hat{Z}_i (TN)	2	280.927			2249.83	2249.79	2249.78	2249.76	2249.72	2249.61	2249.58	2249.55	2249.56	2249.54	2249.49	2249.48		
			\hat{Z}_i ajustada			2249.787	2249.760	2249.733	2249.706	2249.679	2249.652	2249.625	2249.598	2249.571	2249.544	2249.517	2249.490	
			corte o relleno			0.047	0.029	0.046	0.054	0.041	-0.041	-0.048	-0.049	-0.011	-0.001	-0.030	-0.012	
\hat{Z}_i (TN)	3	260.927		2249.84	2249.83	2249.8	2249.79	2249.77	2249.72	2249.61	2249.59	2249.61	2249.58	2249.55	2249.52	2249.46		
			\hat{Z}_i ajustada		2249.830	2249.803	2249.776	2249.749	2249.722	2249.695	2249.668	2249.641	2249.614	2249.587	2249.560	2249.533	2249.506	
			corte o relleno		0.007	0.029	0.023	0.038	0.045	0.020	-0.063	-0.050	-0.003	-0.005	-0.007	-0.017	-0.049	
\hat{Z}_i (TN)	4	240.927		2249.87	2249.82	2249.77	2249.74	2249.72	2249.69	2249.61	2249.63	2249.66	2249.64	2249.6	2249.54	2249.44		
			\hat{Z}_i ajustada		2249.845	2249.818	2249.791	2249.764	2249.737	2249.711	2249.684	2249.657	2249.630	2249.603	2249.576	2249.549	2249.522	
			corte o relleno		0.024	0.003	-0.019	-0.028	-0.017	-0.026	-0.071	-0.031	0.027	0.036	0.019	-0.010	-0.083	
\hat{Z}_i (TN)	5	220.927		2249.91	2249.87	2249.83	2249.76	2249.72	2249.69	2249.66	2249.63	2249.66	2249.67	2249.68	2249.64	2249.59	2249.52	
			\hat{Z}_i ajustada		2249.888	2249.861	2249.834	2249.807	2249.780	2249.753	2249.726	2249.699	2249.672	2249.645	2249.618	2249.591	2249.564	2249.537
			corte o relleno		0.023	0.009	-0.009	-0.045	-0.064	-0.065	-0.068	-0.073	-0.011	0.029	0.058	0.051	0.026	-0.022
\hat{Z}_i (TN)	6	200.927	2249.89	2249.83	2249.85	2249.88	2249.85	2249.79	2249.77	2249.76	2249.75	2249.75	2249.74	2249.73	2249.75			
			\hat{Z}_i ajustada	2249.931	2249.904	2249.877	2249.850	2249.823	2249.796	2249.769	2249.742	2249.715	2249.688	2249.661	2249.634	2249.607		
			corte o relleno	-0.041	-0.078	-0.032	0.025	0.023	-0.002	0.003	0.016	0.039	0.062	0.082	0.100	0.144		



También se aplicó el método de los cuatro vértices para determinar los volúmenes de cortes y rellenos. Se ordenaron los espesores de corte o relleno ajustados con Δ . Para los volúmenes de corte o relleno se aplicó la ecuación (5) o (6) en cada vértice, la cual fue alimentada con los datos de las cuatro esquinas del vértice en cuestión; en los vértices externos a los bordes, de acuerdo a la recomendación de USDA, se asumió que su valor es idéntico al del vértice más cercano dentro de los bordes del terreno. Este método implica que en el área de influencia de un vértice o nodo (20×20 m) puede haber cortes o rellenos por lo tanto se aplicaron las dos ecuaciones (15 y 16) en cada vértice. Con este método el volumen de corte resultó de 447.651 m^3 y de relleno 317.036 m^3 , lo que implica una relación $Q = 1.41$.

$$\tilde{V}_c = \frac{L^2}{4} \cdot \frac{(\sum C)^2}{\sum C + |\sum R|} \quad (5)$$

$$\tilde{V}_r = \frac{L^2}{4} \cdot \frac{(\sum R)^2}{\sum C + |\sum R|} \quad (6)$$

- \tilde{V}_c = Volumen de corte en el cuadro correspondiente, en m^3
- \tilde{V}_r = Volumen de relleno en el cuadro correspondiente, en m^3
- $\sum C$ = Suma de espesores de corte en los vértices del cuadro correspondiente
- $\sum R$ = Suma de espesores de relleno en los vértices del cuadro correspondiente

En la Figura 2 se muestra la triangulación para la cuadrícula regular, así como las curvas de nivel con sus elevaciones después del ajuste del plano proyecto. Con las curvas como líneas rectas se nota la generación de un plano con las pendientes del proyecto que se calculó. En el estudio no fue necesario proponer otras pendientes para evitar movimiento de tierras adicionales; ajustándose a las del terreno natural con el método de mínimos cuadrados, resultan valores que son adecuados para la tecnificación del riego por gravedad, donde el IMTA recomienda que no sobrepasen de 2% para reducir las velocidades erosivas del riego.

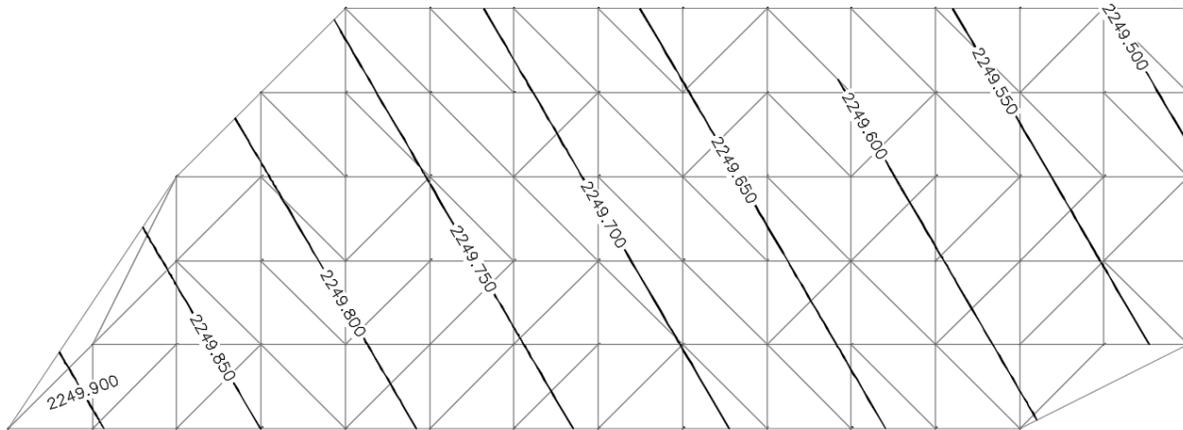


Figura 2. Esquema de la triangulación de la cuadrícula regular y las curvas de nivel que resultan con el plano proyecto ajustado al coeficiente de abundamiento (0.3). Escenario 2019.

Cálculo para la nivelación de tierras del Escenario 2021

Después de retirar el rastrojo del ciclo de producción 2020 se preparó la parcela con un paso del arado de disco y en esas condiciones se obtuvo la información del relieve de la parcela siete de la FESC. Los datos del levantamiento para el Escenario 2021 se obtuvieron mediante el método de radiaciones, siguiendo un orden sistemático para obtener un conjunto de puntos representativos que posteriormente se utilizaron como insumo para identificar por interpolación las coordenadas rectangulares (x, y, z) de una cuadrícula regular (20×20 m) del terreno natural (TN). Con las coordenadas del levantamiento se obtuvo el plano con las curvas de nivel que se observan en la Figura 3.

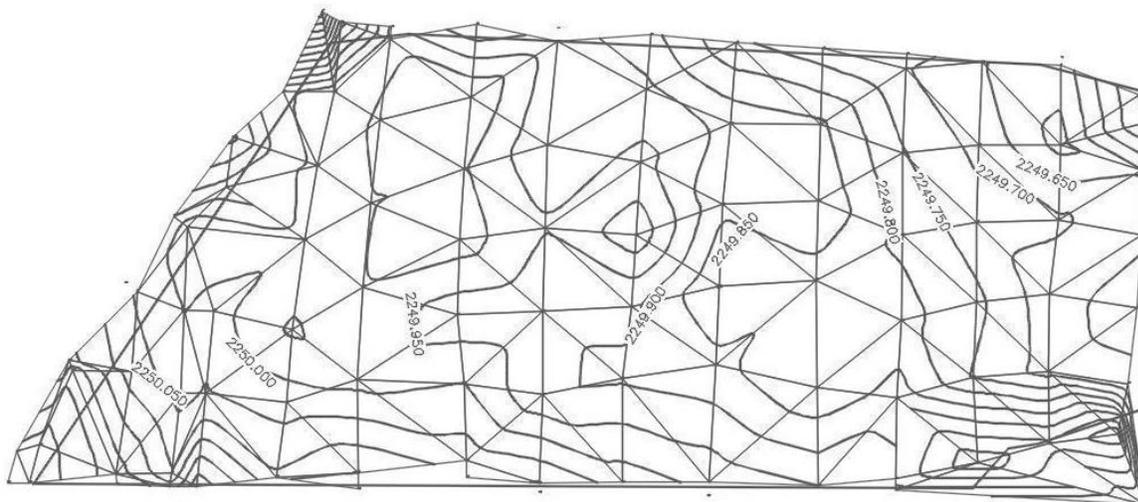


Figura 3. Configuración topográfica de la parcela siete a partir del levantamiento con radiaciones. Escenario 2021.

Obtención del plano proyecto

A los datos del levantamiento para el Escenario 2021 se les aplicó el método de mínimos cuadrados; el origen del sistema coordinado fue el mismo del 2019 tomando la misma convención de signos en los ejes; también se utilizó la misma poligonal para comparar los resultados del proyecto de nivelación.

Para obtener la ecuación (1) del plano proyecto, se utilizó $N = 104$.

Resultando los cocientes:

$$A = \frac{D_A}{D} = \frac{37,842,400,110,886,900}{16,809,153,221,932} = 2,251.297 \text{ m}$$

$$B = \frac{D_B}{D} = \frac{-26,066,833,968}{16,809,153,221,932} = -0.001551 \text{ m}$$

$$C = \frac{D_C}{D} = \frac{-19,158,309,472}{16,809,153,221,932} = -0.001140 \text{ m}$$

Por lo tanto, el plano proyecto del Escenario 2021 resultó:

$$\hat{Z}_{ij} = 2,251.297 + (-0.001551)X_i + (-0.001140)Y_j$$

Se nota que las pendientes son negativas y son congruentes con las condiciones de la parcela y con la convención de signos utilizada.

Los datos x_i, y_j, z_{ij} del levantamiento por radiaciones se procesaron en el programa SINIVET 5.0 para obtener una cuadrícula homogénea de tamaño 20×20 . Los ejes se definieron de acuerdo a la cuadrícula del Escenario 2019. En cada nodo se aplicó la ecuación del plano proyecto $\hat{Z}_{ij} = 2,251.297 + (-0.001551)X_i + (-0.001140)Y_j$ que representa la nueva elevación \hat{Z}_{ij} para el mínimo movimiento de tierras; con esos resultados, se calcularon los espesores de corte y relleno, donde se obtuvieron los valores $\sum C_{ij} = 1.603 \text{ m}$ y $R_{ij} = 1.578 \text{ m}$, con número de rellenos $N_r = 37$ y número de cortes $N_c = 39$; por lo tanto, la relación corte/relleno resulta $Q = 1.0$.

Ajuste del plano proyecto

Como se espera un abudamiento del 30% entonces los cortes deben superar a los rellenos en ese porcentaje y el valor deseado de $Q = 1.3$, lo que implica el ajuste del plano proyecto a Δ .

$$\Delta = \frac{Q \sum_{j=1}^{N_r} R_j - \sum_{i=1}^{N_c} C_i}{Q N_r + N_c} = \frac{1.3 \cdot 1.578 - 1.603}{1.3 \cdot 37 + 39} = 0.005 \quad (2)$$

El ajuste de la ordenada al origen del plano proyecto es $\Delta = 0.005 \text{ m}$ que indica un desplazamiento vertical de 5 mm. Por lo tanto la ecuación para calcular \hat{Z}_{ij} ajustada a Δ es $\hat{Z}_{ij} = 2,251.292 + (-0.001551)X_i + (-0.001140)Y_j$. Nuevamente se calcularon los espesores de corte y relleno, donde $C_{ij} = 1.806 \text{ m}$ y $R_{ij} = 1.400 \text{ m}$; la relación corte/relleno resulta $Q = 1.3$ que coincide con el valor deseado.

Cálculo de volúmenes de corte y relleno

Para obtener el volumen de corte y relleno se utilizó el método de la adición. El volumen total de corte resultó 722.234 m^3 y de relleno 559.849 m^3 , estos valores coinciden con la relación $Q = 1.3$.

El Cuadro 2, muestra la forma de la cuadrícula regular que genera con interpolación el programa SINIVET 5.0 y también se indican las elevaciones ajustadas con los valores de corte o relleno que corresponde a cada nodo.

Cuadro 2. Elevaciones y espesores de corte y relleno para el proyecto ejecutivo de nivelación de tierras del Escenario 2021.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
x/y		559.2740	579.2740	599.2740	619.2740	639.2740	659.2740	679.2740	699.2740	719.2740	739.2740	759.2740	779.2740	799.2740	819.2740	839.2740		
\hat{Z}_i (TN)	1	300.927				2249.99	2250.01	2249.97	2249.93	2249.91	2249.84	2249.8	2249.75	2249.68	2249.64	2249.7		
			\hat{Z}_i ajustada				2249.958	2249.927	2249.896	2249.865	2249.834	2249.803	2249.772	2249.772	2249.710	2249.679	2249.648	
corte o relleno	1	300.927				0.028	0.080	0.077	0.060	0.072	0.036	0.030	0.008	-0.028	-0.039	0.051		
			\hat{Z}_i (TN)			2250.03	2249.99	2250.02	2249.97	2249.93	2249.96	2249.89	2249.88	2249.81	2249.72	2249.65	2249.63	
corte o relleno	2	280.927			2250.012	2249.981	2249.950	2249.919	2249.887	2249.856	2249.825	2249.794	2249.763	2249.732	2249.701	2249.670		
			\hat{Z}_i ajustada			0.019	0.012	0.066	0.046	0.042	0.104	0.061	0.089	0.043	-0.011	-0.056	-0.041	
corte o relleno	3	260.927		2249.98	2249.99	2250	2250.02	2249.97	2249.97	2250	2249.85	2249.86	2249.82	2249.75	2249.71	2249.68		
			\hat{Z}_i ajustada		2250.065	2250.034	2250.003	2249.972	2249.941	2249.910	2249.879	2249.848	2249.817	2249.786	2249.755	2249.724	2249.693	
corte o relleno	3	260.927			-0.081	-0.040	-0.005	0.044	0.032	0.062	0.117	0.002	0.046	0.036	-0.002	-0.015	-0.017	
			\hat{Z}_i (TN)			2250.01	2249.96	2249.99	2249.95	2249.93	2249.92	2249.9	2249.81	2249.82	2249.83	2249.78	2249.71	2249.64
corte o relleno	4	240.927			2250.088	2250.057	2250.026	2249.995	2249.964	2249.933	2249.902	2249.871	2249.840	2249.809	2249.778	2249.747	2249.716	
			\hat{Z}_i ajustada			-0.079	-0.097	-0.041	-0.042	-0.038	-0.014	-0.005	-0.058	-0.018	0.016	0.006	-0.036	-0.076
corte o relleno	5	220.927		2250.07	2250.04	2250	2249.98	2250	2249.94	2249.9	2249.89	2249.86	2249.81	2249.84	2249.81	2249.74	2249.73	
			\hat{Z}_i ajustada		2250.142	2250.111	2250.080	2250.049	2250.018	2249.987	2249.956	2249.925	2249.894	2249.863	2249.832	2249.801	2249.770	2249.739
corte o relleno	5	220.927			-0.076	-0.073	-0.082	-0.065	-0.021	-0.043	-0.054	-0.035	-0.030	-0.049	0.010	0.008	-0.029	-0.012
			\hat{Z}_i (TN)	2250.28	2250.14	2250.14	2250.09	2250.11	2250.09	2250.05	2250.01	2249.97	2249.94	2249.91	2249.9	2249.96		
corte o relleno	6	200.927			2250.196	2250.165	2250.134	2250.103	2250.072	2250.041	2250.010	2249.979	2249.948	2249.917	2249.886	2249.855	2249.824	
			\hat{Z}_i ajustada	0.086	-0.035	0.010	-0.016	0.035	0.048	0.042	0.030	0.022	0.024	0.026	0.042	0.133		

También se aplicó el Método de los cuatro vértices para determinar los volúmenes de cortes y rellenos. Se ordenaron los espesores de corte o relleno ajustados a Δ . Con este método el volumen de corte resultó de 537.060 m^3 y de relleno 413.432 m^3 , lo que implica

una relación $Q = 1.30$, sin embargo, los volúmenes difieren respecto al método de la adición.

En la Figura 4 se muestra una representación de las condiciones finales del plano proyecto ajustado, se observa la triangulación para la cuadrícula regular, así como las curvas de nivel con sus elevaciones después del ajuste del plano proyecto. Con las curvas como líneas rectas se nota la representación del plano con las pendientes del proyecto que se calculó. Al igual que en el Escenario 2019 no fue necesario modificar las pendientes naturales ya que generan resultados satisfactorios relacionados con el movimiento de tierra y con las inclinaciones propicias para el manejo del agua.

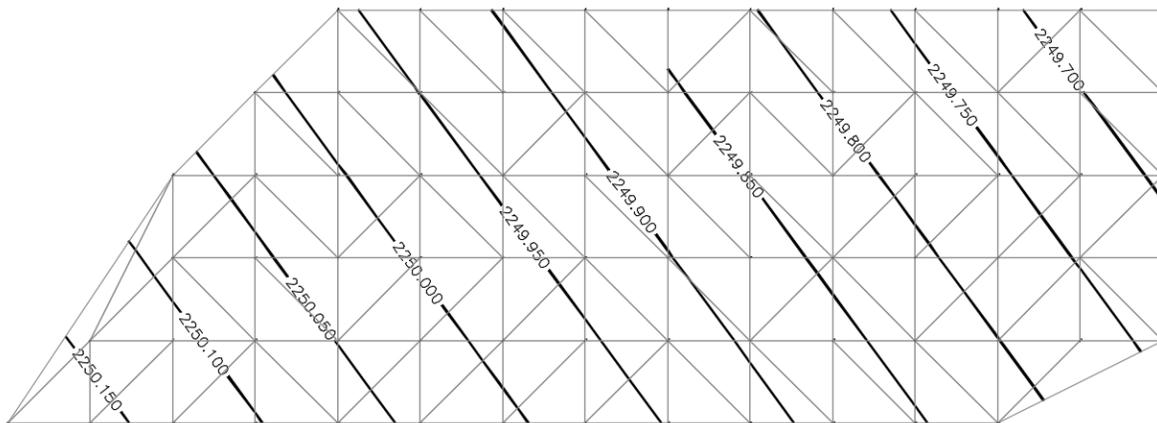


Figura 4. Esquema de la triangulación de la cuadrícula regular y las curvas de nivel que resultan con el plano proyecto ajustado al coeficiente de abundamiento (0.3). Escenario 2021.

Análisis de los dos Escenarios

Los cálculos para el Escenario 2019 y el Escenario 2021, se realizaron con las mismas coordenadas de la cuadrícula regular, este proceso fue posible por la condición geométrica del levantamiento topográfico.

En 2019 se realizó el levantamiento al final del ciclo de producción cuando el suelo se asienta por la compactación que generan las labores culturales como el riego y el paso de la maquinaria. En 2021 se realizó cuando el suelo estaba expandido después del paso del arado de discos.

La diferencia de la ordenada al origen es de 0.454 m y está relacionada con el relieve en ambos periodos, pero no significa un desfase de la superficie debido a que el origen está fuera de la poligonal de la parcela y corresponde a una proyección de las pendientes que minimizan el movimiento de tierras.

En 2019, las pendientes resultan de -0.134% y -0.078% mientras que en 2021 resultaron -0.15% y -0.11%. La diferencia es un incremento en la inclinación de 2 y 4 cm en X e Y por cada 100 m. Son pendientes adecuadas para la tecnificación del riego por gravedad y para el diseño permiten manejar caudales elevados sin causar erosión del suelo. Los cambios de relieve entre un Escenario y otro generaron un cambio en el ajuste, desplazamiento vertical, del plano proyecto y resultó en orden cronológico de 1 y 5 mm. Este movimiento artificial del plano propicia la relación corte/relleno buscada que en el trabajo fue $Q = 1.3$ relacionada con el coeficiente de abundamiento de 0.3 lo cual significa un incremento en volumen del suelo franco arcilloso del 30% cuando se generan la excavación (cortes), según el triángulo de Trueba.

Los métodos para calcular el volumen de cortes y rellenos arrojaron resultados diferentes, esto es debido a que a pesar de que las ecuaciones de los respectivos métodos son alimentadas con las variables de cortes y rellenos, cada fórmula posee un planteamiento diferente. Los volúmenes más grandes se presentan en el Escenario 2019 y en el caso de los cortes ascienden a 722.234 m^3 ($292.978 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) que con el costo actual utilizado en los distritos de riego del centro del país, representa un costo máximo de \$21.667.02 para toda la parcela (3.1 ha) que corresponde a 6,989.361 \$/ha. La literatura señala que para la viabilidad de estos trabajos se recomienda que el movimiento de tierra no supere los $600 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y el resultado está dentro del rango.

Con lo anterior queda de manifiesto la importancia de realizar el levantamiento y cálculo de los parámetros previo a la ejecución de la nivelación de tierras ya que el relieve es dinámico a través del tiempo en las parcelas agrícolas.

Conclusiones

A partir de los objetivos y los resultados del presente estudio, se muestran las siguientes conclusiones:

A través de la metodología utilizada, se obtuvieron las ecuaciones del plano proyecto para el mínimo movimiento de tierras. Las ecuaciones del plano proyecto son diferentes en cada Escenario no obstante a utilizar el mismo método, pues las condiciones del terreno modifican los resultados de los cálculos para la nivelación de tierras, por ejemplo, la mecanización genera movimientos que modifican las pendientes en cada paso del implemento, además de que en una parcela que se riega por gravedad, las labores del cultivo causan desacomodos en la superficie.

Se encontraron diferencias en las pendientes y por lo tanto en los volúmenes de corte y relleno; se atribuye el cambio del relieve a la dinámica de la parcela a través del tiempo por las labores culturales. En este sentido se recomienda realizar el cálculo previo a la ejecución de la nivelación en las condiciones reales. Las pendientes son congruentes con el manejo del riego de la parcela siete; en la dirección del eje x se traza la regadera y en la del eje y se construyen los surcos.

Con el cálculo de los volúmenes de cortes y rellenos con dos métodos diferentes, adición y cuatro vértices, se estimó el costo de movimiento de tierras por m³. El método de la adición genera valores más bajos de movimientos de tierra, pero la literatura señala que el método de los cuatro vértices es más preciso que el método de la adición.

Referencias Bibliográficas

- Franquet, B. J., Querol, G. A. 2010. *Nivelación de terrenos por regresión tridimensional. Una aplicación de los métodos estadísticos*. UNED. España.
- Hernández, S. F., Sánchez, B. J. 2007. Nivelación de tierras. En *Manual para diseño de zonas de riego pequeñas*. Instituto Mexicano de Tecnología de Agua.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2016. Conocimiento y tecnología para la gestión sustentable del agua. *Informe Anual IMTA 2015*.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2020. *Uso de herramientas geoespaciales para la nivelación de terrenos agrícolas*. Recuperado de <https://www.gob.mx/imta/es/articulos/uso-de-herramientas-geoespaciales-para-la-nivelacion-de-terrenos-agricolas?idiom=es>
- Navarro, Á. M. 2018. Nivelación de tierras: una opción viable para el uso eficiente y gestión sustentable del agua en la agricultura. *Ingeniería y Región*, 9.
- Prado, H. J., Hernández, S. F. 2014. *Nivelación de tierras con tecnología GPS*. Memoria. XXX Presentación de Trabajos de Investigación, Producción y Servicio.
- Sánchez, M. A., García, L. A., Tejeda, M. V., Agüero, J. M., Concepción, O. R., Vilalta, A. J., Ramos, D. S. 2020. Utilización de sistemas satelitales para la nivelación de campos arroceros. *Revista Ingeniería Agrícola*, 10(2).