

Los sistemas de control para maquinaria de movimiento de tierras

Francisco Ballester Muñoz

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Daniel Castro Fresno

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Universidad de Cantabria. Departamento de Transportes y Tecnología de P. y P. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos.

Serafín López-Cuervo Medina

Ingeniero en Geodesia y Cartografía

Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Politécnica de Enseñanza Superior

RESUMEN

El desarrollo logrado en los últimos años por la informática, tiene en el mundo de la topografía su mayor expresión en una nueva forma de entender la aplicación de las ciencias geográficas llamada geomática. Ni que decir tiene, que estos desarrollos tenían que acercarse a las aplicaciones más directas en el campo de la maquinaria, el control de máquinas lleva varios años contemplando distintas innovaciones y hoy día cuenta, además, con sistemas de control para maquinaria en muy diversos tipos de aplicaciones, desde excavadoras hasta automatización de motoniveladoras y extendedoras. La automatización representa el mayor hito a alcanzar dentro de las aplicaciones geomáticas y se encuentra ahora en sus inicios, este artículo resume la situación actual dentro de la maquinaria para obra civil.

ABSTRACT

The development achieved in the last years by the computer science, has in the world of the topography its biggest expression in a new form of understanding the application of the sciences geographical called geomatic. Neither to say that, these developments had to come closer to the most direct applications in the field of the machinery, the control of machines takes several years contemplating different innovations and nowadays bill, also, with control systems for machinery in very diverse types of applications, from diggers until motor grader automation and spreaders. The automation represents the biggest landmark to reach inside the applications geomatics and he/she is now in its beginnings, this article summarises the current situation inside the machinery for civil work.

La evolución lograda en el mundo de la geomática, junto con el crecimiento que la construcción española ha experimentado en los últimos años, ha dado pie a que todas las empresas del sector se planteen la incorporación de innovaciones tecnológicas a sus procesos constructivos. De

esta forma pretenden mejorar sus índices de Productividad, Seguridad, Calidad y respeto con el Medioambiente.

Una de las principales actuaciones recogidas en el proyecto de cualquier tipo de infraestructura es el movimiento de tierras, tanto por su repercusión económica, como por su impli-

cación en la planificación, sus posibles Impactos Medioambientales o su relación con la Seguridad en la Obra.

Aunque la materialización de un proyecto de construcción supone un replanteo de una geometría espacial, con diversos grados de precisión, sobre un terreno natural que se ha modelizado de forma discreta, los sistemas empleados para estos trabajos pueden sustituirse por otros en el resto de la obra. A pesar de todo, todavía hoy en día, se pueden encontrar obras donde la nivelación de terrenos que se realizan con las tradicionales estacas. Sistema lento e impreciso, a tenor de lo demostrado por los equipos automáticos, que impide en ocasiones lograr la calidad y respeto al medio ambiente demandados.

En la última década, el número de sistemas utilizados en maquinaria para obra civil ha crecido de forma importante. Desde indicadores hasta sistemas automáticos, estos equipos crecen día a día gracias a las importantes ventajas que presentan en el trabajo de movimiento de tierras.

Se han aplicado avances importantes en el campo de la topografía, proporcionando nuevos sistemas de guiado y de replanteo automático y en el campo de la maquinaria, mediante la automatización del accionamiento de máquinas, etc. Se puede decir, que en la actualidad está totalmente consolidado el control discreto automático, basado en el control puntual de la posición.

Con ello se consigue que el operador de la máquina tenga una referencia y un control inmediato del tajo que ejecuta a fin de economizar su tiempo, controlar su actuación frente al medio y lograr un resultado de mayor calidad consiguiendo los objetivos de calidad, producción, etc. cada vez más demandados por la administración y las empresas.

Estos sistemas utilizan tecnologías de **Láser**, **Ultrasonidos**, **3D** y se han aplicado en diferentes tipos de máquinas de movimiento de tierras y extendido de materiales.

Por último, se esbozarán posibilidades de auténtica navegación tridimensional de la maquinaria, sin necesidad de puntos materializados de forma continua como referencia, apoyados en técnicas de geodesia espacial.

1. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS Y SISTEMAS ACTUALES

Como se ha anunciado anteriormente, los equipos se enmarcan dentro de las tecnologías láser, ultrasonidos y 3D, estas últimas se basan en el uso de estaciones totales o

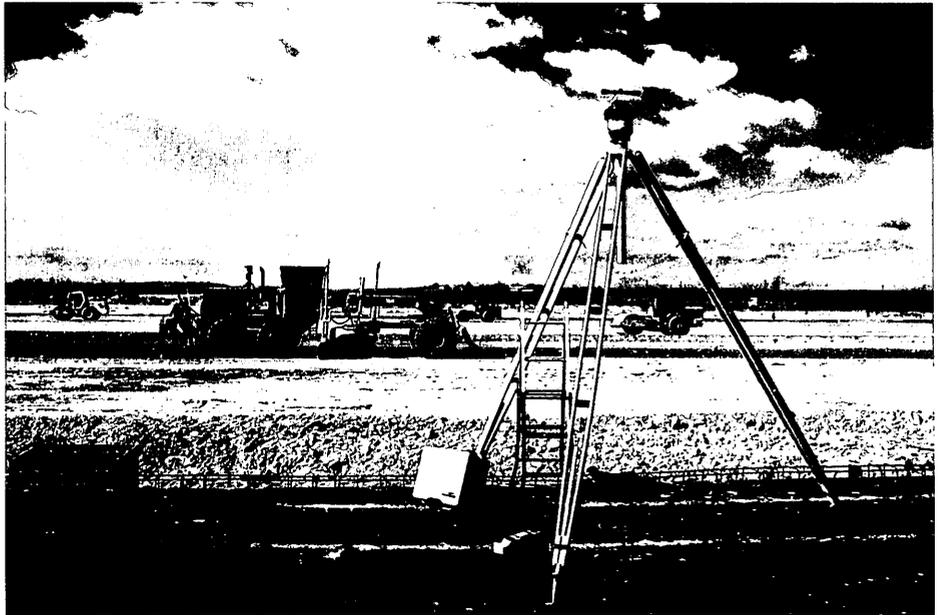


Figura 1. Aplicaciones láser para nivelación de superficies.

GPS, en función de los requerimientos que en posicionamiento y cota se exigen.

1.1 Tecnología láser

Mediante un emisor láser se genera un plano horizontal o inclinado que sirve de comparación y que, reflejado en un receptor situado sobre la máquina, permite conocer en cualquier punto de la superficie, la diferencia de cota con respecto al plano de referencia (Fig 1), que evidentemente es preciso materializar por métodos topográficos convencionales, referido al sistema referencial de proyecto. Se facilita de esta forma la explanación de las superficies a simple o doble pendiente, la alineación de bordillos, tuberías o zanjas, la generación de zanjas con una pendiente uniforme, etc. Para lo cual será necesario acotar la superficie en planta en la cual tiene validez el plano.

El número de aplicaciones es muy alto: Retropalpas para excavación de zanjas, tractores para explanación, excavadoras para movimiento de tierras, motoniveladoras para grandes explanaciones e incluso extendedoras. En todos los casos, el receptor, su ubicación y las posibilidades de trabajo dependerán del tipo de máquina y trabajo a realizar.

1.2 Tecnología ultrasonidos

Este tipo de sistemas permite conocer la distancia entre el emisor y una superficie de rebote mediante la velocidad del sonido y el tiempo de retardo en la recepción de la señal emitida (Fig 2). En maquinaria para obra civil se utiliza en aplicaciones donde el sistema láser se encuentra limitado por el gran número de planos de comparación que define la superficie de



Figura 2. Nivelación de obra lineal con ultrasonidos.

trabajo, como el caso de una obra lineal. Así, el constante cambio de pendiente a lo largo de la traza impide la aplicación del láser, mientras que los sistemas de ultrasonidos no cuentan con tal limitación. Gracias a un cable de nivelación situado en un lateral de la zona de trabajo, que se materializa mediante nivelación geométrica utilizando técnicas topográficas tradicionales, se permite la realización de una pasada maestra, véase el caso de una motoniveladora refinando zahorra, (Fig II). una vez hecho el primer pase, la niveladora copia la maestra en sucesivos pases.

Dentro de las distintas aplicaciones se encuentra el refino con motoniveladoras, el extendido de materiales con extendedoras o pavimentadoras, el movimiento de tierras con tractores, etc.

1.3 Tecnologías 3D: Materialización planimétrica y altimétrica

En los casos anteriores se copia un plano o una distancia, pero como ya se ha anotado, se debe de estaquillar el límite del trabajo a realizar e incluso, según el sistema o equipo, se deben replantear las referencias que limiten los cambios de pendiente en las superficies. El movimiento de tierras se define por una cota o altura frente a un plano de comparación (hemos visto como generar un plano de comparación por láser o ultrasonidos) y una pendiente de la superficie (en el caso de láser, sí es fija a una o doble pendiente se introduce previamente en el emisor, pero si es cambiante habrá que modificarla donde sea necesario).

Las tecnologías 3D resuelven gran parte de las tareas manuales que tanto el láser como los ultrasonidos necesitan. Co-

nociendo de antemano la posición de la máquina en la zona de trabajo y mediante la comparación de esa posición y una teórica de proyecto, calcula la cota y la pendiente que debe tener la cuchara de una retro pala, la hoja del tractor, la cuchilla de la motoniveladora o la regla de la extendidora, así como el número de pasadas realizado por un compactador y la cota del mismo (Fig. 3).

No obstante, el automatismo en la "navegación" de la maquinaria exige resolver los siguientes problemas:

▼ *Conocer matemáticamente en tiempo real dos superficies:* La superficie de proyecto se puede conocer de forma continua a partir de la generación de un modelo digital del terreno. Se definirá la superficie natural a partir de una base topográfica existente, bien mediante el uso de una estación total o por técnicas de geodesia espacial usuales, es posible conocer la posición para situar el reflector o antena, respectivamente.

En ambos casos se tiene información de la posición puntual. Por comparación de posiciones consecutivas, se puede conocer la evolución de la pendiente en el sentido de avance de la máquina, no disponiendo de información transversal, asociada al peralte en obras lineales.

▼ *Materializar un sistema de referencia respecto al cual se "navega":* Su concreción es muy diferente con las posibilidades existentes. La estación total precisa la materialización de vértices topográficos, con visibilidad directa buena, próximos al área de trabajo, a distancias no superiores a 300-400 m, para garantizar precisiones adecuadas. Sin embargo, el GPS emplea métodos relativos o diferenciales, un único receptor de diferencia, trabajando aislado y sin necesidad de personal alguno, pudiendo cubrir un radio de 10-12 Km.

▼ *Configurar un enlace entre los equipos de medida:* El control de la estación total se realiza habitualmente desde el elemento de reflexión. A diferencia, el GPS, precisa de la corrección del equipo móvil a partir de los datos observados en la referencia. En función de la precisión requerida, se pueden efectuar correcciones relativas, o de código de la portadora con precisiones mayores de 1m, o diferenciales, de la fase portadora, con precisiones de pocos centímetros. Habitualmente se emplean comunicaciones vía radio, aunque es posible utilizar tecnologías de telefonía móvil digital.

Para ello es necesario, en el caso de una motoniveladora, un sistema de posición (estación total o GPS), un prisma de 360° activo en la cuchilla o una antena GPS, un sistema de comunicación entre estación/GPS y la máquina (por ejemplo radio o rayo láser), y un ordenador a bordo de la motoniveladora en la posición del operador, donde éste pueda seleccionar el trabajo a realizar y la altura de aproximación en función del material. El ordenador de abordaje permite una organización y

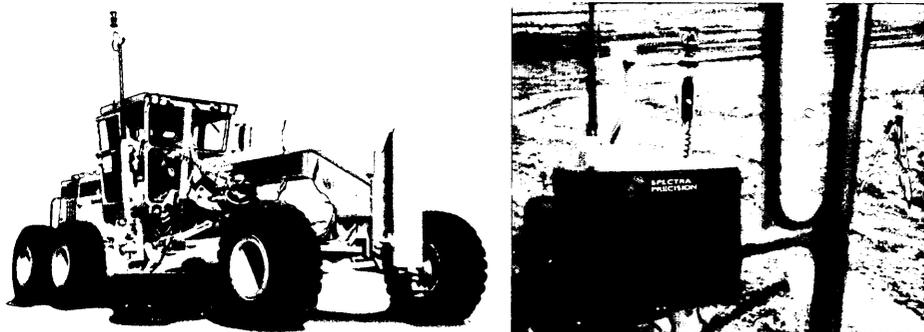


Figura 3. Sistema 3D. a) Motoniveladora con el mástil del prisma activo. b) Ordenador de abordo.

gestión del trabajo, facilitando una optimización de los tiempos, del material a emplear y un aumento significativo de la producción.

La precisión de acabado está limitada por el aparato capaz de dar posición a la máquina. Así los sistemas GPS mediante sistemas RTK (sistemas de posicionamiento en tiempo real, mediante la fase de la portadora) permiten obtener precisiones de 1 – 2 cm en posición y 3 – 4 cm en cota, aceptables para excavadoras, tractores o compactadores. Por otro lado, la estación total permite obtener precisiones de varios milímetros en posición y cota en función de la distancia entre el aparato y la máquina, aptas para motoniveladoras y pavimentadoras o extendedoras.

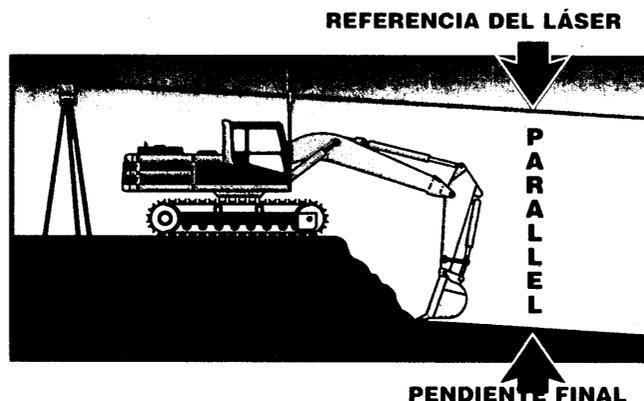
2. DIFERENTES APLICACIONES, MÁS UTILIZADAS EN LA ACTUALIDAD, EN FUNCIÓN DE LA MÁQUINA

2.1 Excavadoras

Para las excavadoras podemos encontrar dispositivos diseñados para el control del trabajo o de la máquina, en este último caso, se restringen los movimientos de la excavadora para evitar accidentes por colisión de los brazos de la máquina



Figura 4. Aplicación láser para excavadoras. a) Excavación a ciegas. b) Excavación a pendiente constante



con instalaciones cercanas, esto se consigue parando la máquina cuando el receptor atraviesa el rayo láser del emisor en una posición determinada.

Fundamentalmente existen dos sistemas de control:

2.1.1 Sistema basado en referencias láser.

Utiliza un receptor láser situado cerca del cazo de la máquina que permite controlar la profundidad de operación y transmitirla a un indicador visible al operador.

El maquinista controla la profundidad y pendiente o la alineación de zanjas, taludes, etc. cada vez que el sensor situado en el brazo de la máquina atraviesa el rayo láser del emisor. Una variación de este sistema es la colocación de más sensores en los distintos brazos de la máquina para seguir continuamente la profundidad e inclinación deseados.

2.1.2 Sistema basado en referencias gravitacionales

El segundo, es un sistema de referencia gravitacional, basado en el cálculo de inclinaciones de distintos elementos de la máquina, a partir de una posición conocida. Utiliza tres sensores de inclinación colocados en los brazos de la máquina, que miden los ángulos de los brazos y el cazo, proporcionando información a una unidad de control. Esta unidad de control procesa los datos y mediante un indicador, le muestra al operario la información que le permite determinar si el nivel del cucharón es el adecuado o por el contrario, si está alto o bajo. El inconveniente está en que la referencia se transfiere manualmente de una posición de trabajo a la siguiente a lo largo del tajo, acumulando los errores de un tramo a otro. Antes de mover la máquina, el operario debe referenciar el punto conocido, alcanzándolo con el cazo desde la posición contigua una vez desplazada la máquina. Esta operación puede llegar a ocasionar imprecisiones a lo largo del proceso.

Las principales ventajas de estos sistemas son: Permiten realizar excavaciones ciegas con profundidad fija o pendiente constante, cortes con pendiente, además de controlar operaciones de extendido y restringir los movimientos de la máquina.

2.2 Tractores - Motoniveladoras

En los tractores, se pueden aplicar las tres tecnologías anteriormente enunciadas,



Figura 5. Emisor y receptor láser sobre excavadora para control automático de pendientes en zanjas.

láser, ultrasonidos y 3D, en función del trabajo a ejecutar, tanto en las operaciones de excavación como en las de relleno. Por su parte, las motoniveladoras también utilizan estos sistemas para el refinado de suelos y zahorras. En las dos máquinas, la operación del maquinista puede ser manual o automática en función de si la máquina cuenta con un sistema de control automático de la cuchilla (mediante tres sensores: Longitudinal, transversal y rotación); O un control manual, que consta de un sistema de indicadores que guiará al operador sobre la necesidad de bajar o subir la cuchilla, e incluso le indicará si debe inclinarla.

La ejecución de planos con pendientes a una o dos aguas por medio de tecnologías láser, se realizará situando sobre la cuchilla del tractor o la hoja de la motoniveladora dos mástiles con sus respectivos receptores láser. Cuando el rayo láser del emisor corte a los dos receptores, los hidráulicos de la má-

quina actuarán automáticamente para copiar la inclinación y altura según el plano de referencia, este caso corresponde a un sistema automático. Si el accionamiento no fuera automático, el operador verá en los indicadores que hidráulico debe accionar y en que sentido, ascendente o descendente.

El empleo de ultrasonidos necesita situar en un lateral de la superficie un cable sostenido por estacas que indica cual es la cota de referencia que se ha de copiar. A la vez la variación de pendiente transversal y sus transiciones se ejecutan manualmente con unas tablillas sobre el cable nivelado que indican la pendiente cada 10 metros. Sobre este cable se sitúa el emisor de ultrasonidos y se realiza un pase maestro que permitirá ir copiando esa primera pasada a lo ancho de la traza. A lo largo de la misma, el operador cambiará, en función de las indicaciones de la pantalla de control, el peralte según le indiquen las tablillas dispuestas sobre el cable.

Por último, el sistema 3D permite conocer la posición de la máquina y contrastarla con un proyecto almacenado en un ordenador a bordo, el cual calculará la corrección de altura y peralte a aplicar a la cuchilla de la máquina. Para tractores bastará con sistemas de posicionamiento con GPS, mientras que para motoniveladoras se emplean sistemas con estación total como demuestran las precisiones de ambos sistemas.

Las ventajas del sistema 3D con respecto al láser y ultrasonidos son evidentes: Mientras que láser y ultrasonidos solo se diferencian entre si por la tipología de tecnología a emplear, permitiendo reducir a una sola fila de estacas por perfil, el caso del 3D elimina todo tipo de estacas, ni siquiera serían necesarias las de límite de trabajo o cambio de peralte que necesitan los otros dos métodos. Mientras que los sistemas por lá-

Figura 6. Receptores láser sobre la cuchilla de un Tractor para nivelación de superficies.





Figura 7.
Sistema 3D
aplicado a un
tractor.

ser y ultrasonidos necesitan situar la referencia en una estaca a 10 ó 20 metros, el sistema 3D tiene referencias en todas las posiciones de forma que la calidad final es muy superior en este caso.

2.3 Pavimentadoras / Extendedoras

Dada la precisión que se exige a los trabajos de pavimentación, tanto por el coste del material a emplear como por las necesidades finales de la superficie, las empresas constructoras han tardado en incorporar este tipo de dispositivos a sus equipos. Hoy en día la precisión que consiguen estos sistemas llega a ser milimétrica, por lo que comienzan a incorporarse a las máquinas pavimentadoras.

En sistemas convencionales se utilizan palpadores para poder mantener la regla paralela a la superficie de referencia. Hoy día los sistemas de ultrasonidos han sustituido a los palpadores mejorando las imprecisiones anteriores, normalmente debidos a golpes a la regla o a la acumulación de material en las mismas. La lectura sobre la cuerda, la misma que se empleó para el caso de las motoniveladoras con ultrasonidos, permitirá conocer cual es la altura de regla a la que se añadirá un segundo sensor para conocer el peralte.

La utilización de sistemas 3D mediante el posicionamiento de estaciones totales, (el GPS no proporciona la precisión requerida), ya experimentados es el próximo paso en las extendedoras, y su método de trabajo será el mismo que el emplea-

do en los 3D para las motoniveladoras anteriormente explicadas.

2.4 Compactadores

Las labores de compactación requieren menos control geométrico, ya que solo necesitan la posición de la máquina, para controlar el número de pasadas, la cota se supone la correcta. Por esta razón se han utilizado técnicas de control mediante GPS. Los sistemas GPS existentes, RTK (Cinemático de tiempo real) o DGPS (GPS Diferencial) en determinadas aplicaciones, proporcionan unos errores que no eran capaces de ser asimilados por los trabajos de nivelación y extendido, pero sí por los de compactación.

Los sistemas RTK permiten obtener precisiones aceptables en movimiento y en tiempo real, capaces de posicionar la máquina de forma que un sistema 3D permita contrastar las posiciones de trabajo del compactador y así controlar las pasadas realizadas por éste, coloreando las distintas zonas e indicando rápidamente cuales tienen una compactación óptima y cuales deficiente.

2.5 Mirando al futuro

La situación actual de estos dispositivos, indica un futuro orientado hacia Sistemas de Navegación empleando metodologías de Geodesia Espacial. Estos métodos utilizarán meto-

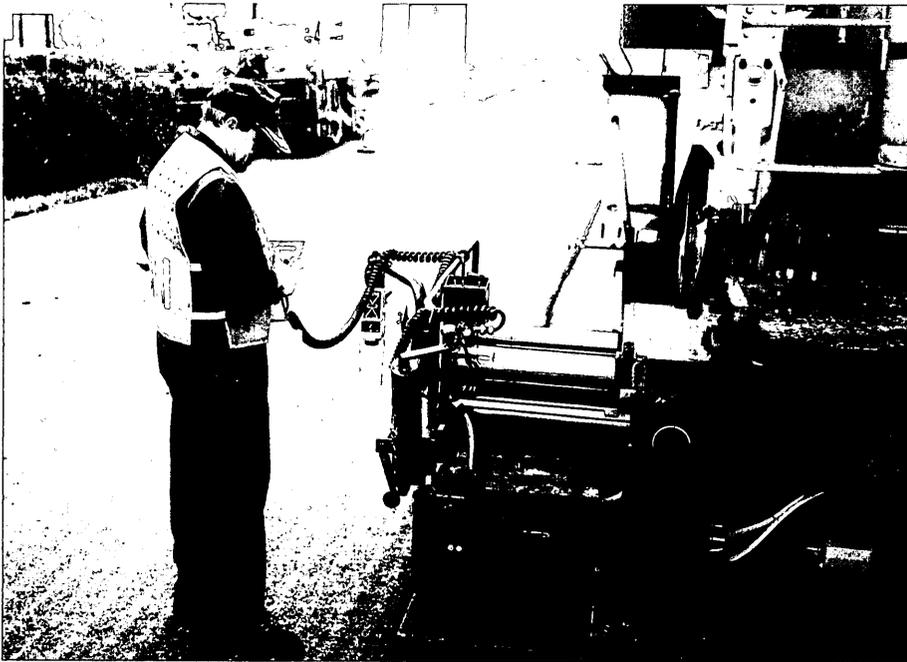


Figura 8. Equipo de ultrasonidos para extendedora de asfalto copiando una maestra.

dología de GPS diferencial con fase de la portadora (RTK). Los equipos serán capaces de determinar la posición, velocidad, pendiente y peralte para cada instante, podrán utilizar la constelación Galileo, GNSS-2 y proporcionarán precisiones de un centímetro en planimetría y altimetría relativa al propio sistema.

3. CONCLUSIONES

En la actualidad, las empresas constructoras están demostrando un interés creciente por estos sistemas de automatización, a tenor de lo indicado por varias de las firmas fabricantes consultadas y teniendo en cuenta que ya existen en España más de 1200 equipos instalados. Este interés se ve especialmente acentuado por los sistemas 3D más avanzados.

Los sistemas automáticos, láser o ultrasonidos, han posibilitado un inicio en la automatización de máquinas con una relación calidad/precio importante, amén del aumento en la calidad que se puede alcanzar con estos equipos. Si además se tiene en cuenta el aumento de la producción logrado con estos sistemas, que según sea la aplicación automatizada, oscila entre el 25 - 50% con respecto a los sistemas tradicionales, la idoneidad de estos sistemas es indiscutible.

Por otro lado, los sistemas 3D merecen una consideración aparte. Estos sistemas, de reciente aparición en España, están ocasionando una verdadera revolución por las ventajas que proporcionan.

Las principales ventajas de estos sistemas son inmediatas:

▼ Estos sistemas ponen a disposición de los operadores una capacidad de trabajo destacable, proporcionándoles una visión global del trabajo a realizar y permitiéndoles una planificación más productiva. El aumento de producción frente al sistema convencional puede llegar en algunas aplicaciones al 50%. A parte de la reducción total de replanteo de estacas.

▼ La eficacia conseguida es mucho mayor como consecuencia de la optimización de los trayectos realizados y los ahorros de material son importantes al no necesitar realizar costosas correcciones. La regularidad de las superficies niveladas con motoniveladoras es muy superior a otros sistemas, eliminándose las irregularidades entre estacas.

▼ También se puede reducir impacto medioambiental como consecuencia de los ahorros de combustible generados a partir de la optimización del número de pasadas. En el mismo sentido, una visión global del proyecto permite al operador

determinar con gran exactitud las áreas de actuación del proyecto, evitando dañar zonas colindantes a las obras.

▼ En cuanto a la seguridad, esta se ve mejorada debido a la eliminación total de operarios en el entorno de la máquina, consiguiéndose de esta forma, reducir el riesgo y siniestralidad laboral.

Todos estos sistemas nos auguran un futuro automático, dentro de la maquinaria para movimiento de tierras, mediante sistemas de control integrales. Sistemas ya no tan desconocidos como el RTK, capaz de dar posiciones GPS de precisión centimétrica cuando la máquina está en movimiento y estaciones totales robotizadas, son el futuro de los sistemas integrados para maquinaria de movimiento de tierras.

BIBLIOGRAFIA

- Excavation and Grading Handbook. Nicholas E. Capachi. Ed Craftsman.
- Laser surveying. Price and Uren. Ed. UNR International Technical Procedures in Machinery. Spectra Precision - INTRAC.
- Topografía. López-Cuervo Estévez. Ed. Mundiprensa.
- Understanding laser Technology. Hitz. Ed Pennwell
- Maquinarias de Movimiento de Tierra. F. Ballester Muñoz
- Otras:
 - <http://www.unican.es/consnet>
 - <http://www.intrac.es>