

# Redes de narcotráfico en México: ¿qué información nos pueden dar las matemáticas?

José Antonio de la Peña

## Resumen

El uso de redes para modelar algunos fenómenos, tales como el narcotráfico, desde el punto de vista matemático, se ha extendido. Se han desarrollado investigaciones que han analizado este tipo de redes en distintas partes del mundo, incluyendo el caso mexicano. Es posible entender la operación de la economía del narcotráfico estudiando la estructura y la evolución de las redes sociales que apoyan sus actividades. Consideramos en detalle un modelo colombiano aplicado a la realidad mexicana.

**Palabras claves:** Narcotráfico, droga, modelos, redes, conexiones.

## Drug trafficking networks in Mexico: What information can mathematics give us?

### Abstract

The use of complex networks to model different phenomena, such as drug traffic, has gained momentum. There are articles studying those networks, including the Mexican case. The analysis of the social networks supporting the trafficking activities is essential to understand the economic background. We consider in more detail a Colombian model applied to Mexican reality.

**Keywords:** Drug trafficking, drugs, models, networks, connections.

## Los problemas

Las noticias en México ganan en dramatismo día con día: hasta el año pasado, el año más violento en la historia reciente del país había sido 2011, todavía en la administración de Felipe Calderón (2006-2012), con 22 409 homicidios, de acuerdo con datos del Secretariado Ejecutivo del Sistema Nacional de Seguridad Pública, cuando la guerra frontal contra los narcotraficantes estaba en su apogeo. En la gráfica 1 se muestran datos anteriores a 2011.

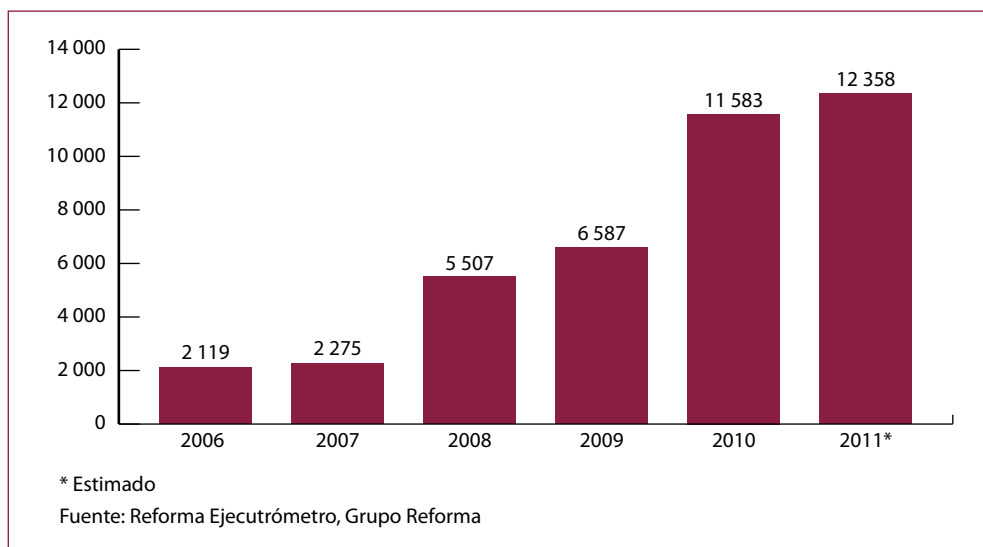
Ese año, las muertes vinculadas al crimen organizado representaron casi el 60% del total. El año 2017, el penúltimo de Enrique Peña Nieto como presidente, fue el año con más asesinatos en México de las últimas décadas, con 25 339 homicidios dolosos, un 23% más que el año anterior. Ese año cerró con 18 989 ejecuciones del crimen organizado, un alza de

55% con respecto del año anterior –destacó Semáforo Delictivo, una ONG mexicana en un comunicado–. La tasa anual de homicidios por cada 100 mil habitantes en el país es ahora de 21. Los estados con tasas superiores a 40 son Colima (99), Baja California Sur (76), Guerrero (65), Baja California (61), Sinaloa (45) y Chihuahua (43). Resulta ilustrativo comparar estos datos con las zonas de influencia de los diferentes cárteles de la droga (Mapa 1).

Estados Unidos es un mercado lucrativo para las drogas ilegales. Casi el 90% de la cocaína que se vende en ese país pasa a través de México; la mayor parte de las metanfetaminas que se vende en Estados Unidos se fabrica en México y casi todos los laboratorios son conducidos por mexicanos.

Los cárteles mexicanos son responsables del flujo de la cocaína, la heroína y

**Gráfica 1.** Asesinatos en México relacionados con la lucha contra las drogas antes de 2011



**Mapa 1.** Zonas de influencia de los cárteles de la droga en México



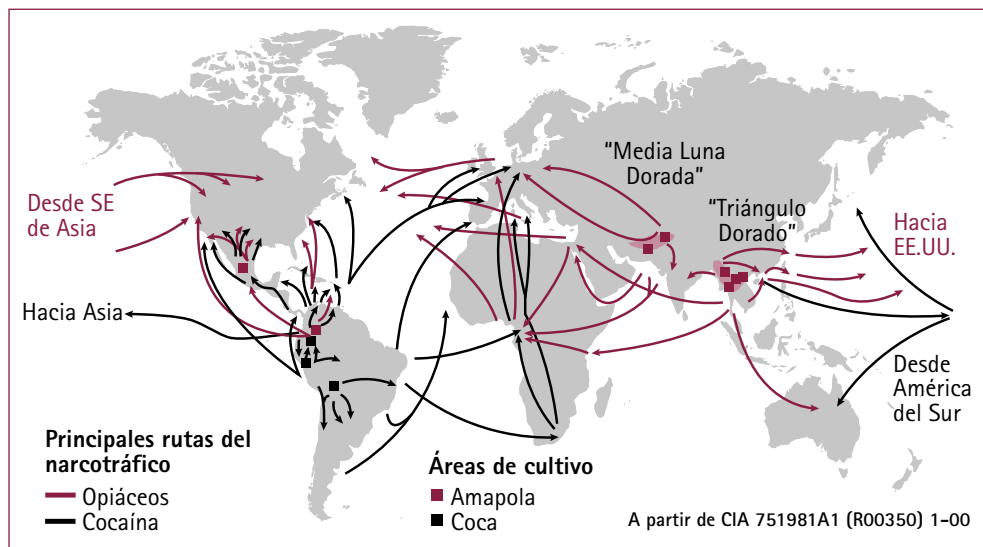
la marihuana que transita entre Latinoamérica y los Estados Unidos. Frecuentemente, estos cárteles usan personas mexicano-americanas y otros traficantes latinos para distribuir sus narcóticos en Estados Unidos (Mapa 2). Una parte de la guerra entre diferentes cárteles se explica por la disputa del norte de México por el tráfico hacia Estados Unidos de drogas.

### Entendiendo las redes de narcotráfico

Los métodos matemáticos han mostrado su utilidad en muchos temas. Por supuesto,

las bondades de la modelación matemática dependen de la cantidad y calidad de la información con que se cuente para insertar en el modelo. El uso de redes para modelar algunos fenómenos, desde el punto de vista matemático, se ha extendido ampliamente y las redes del narcotráfico no son la excepción (Pichardo y De la Peña, 2018). Se han desarrollado investigaciones que han analizado este tipo de redes en distintas partes del mundo, incluyendo el caso mexicano. Las investigaciones muestran las ventajas de

Mapa 2. Las principales rutas internacionales del narcotráfico



estudiar las redes del narcotráfico: determinar la estructura subyacente de las redes y propiedades relacionadas, tales como la resiliencia y la comunicabilidad entre los individuos para identificar la importancia relativa de los individuos de la red, entre otras. Estas propiedades pueden ser fundamentales para planear la desarticulación de estas redes, lo cual tiene implicaciones en materia de seguridad y salud pública.

Como un ejemplo del terrible grado de impunidad y la debilidad del Estado de derecho en México, citamos el hecho de que en todo el país hay solo 30 800 personas encarceladas por asesinato, mostrando además, la cantidad de crímenes sin resolver. El panorama actual del crimen organizado en México es extremadamente fluido. Por ejemplo, en *Beyond 2012*, Sam Logan y James Bosworth describen la multiplicación de grupos criminales

en México, cuando "brincan" de solo seis grupos significativos que se habían contado en 2006.

Ninguna empresa ilegal puede producir, traficar y distribuir drogas ilícitas sin un sistema de defensa y corrupción que preserve la propiedad, vele por la seguridad y garantice el cumplimiento de los contratos en todos los eslabones de la cadena, no solo ante la persecución de las autoridades sino ante la acción violenta de narcotraficantes rivales (Raffo y Segura, 2015). Los agentes que trabajan para proteger a una empresa criminal, a quienes en adelante llamamos *agentes de defensa y corrupción*, suelen realizar sus actividades de defensa, coerción y corrupción como asalariados, y se pueden catalogar como informales porque la ley y el Estado no protegen estas actividades por su ilegalidad (Martín, 2008). Martín resalta que la ilegalidad de estas

actividades asalariadas nada tiene que ver con el tamaño de las organizaciones, pues son empresas que en el conjunto de toda la cadena productiva pueden tener gran escala, muchas veces de índole transnacional. Sus estructuras pueden tener diversos niveles de complejidad y sofisticación dependiendo de la oferta y la demanda de defensa de los narcotraficantes. El ejemplo de Colombia es ilustrativo: durante las últimas tres décadas el sistema de defensa de los narcotraficantes ha cambiado a medida que el negocio ha evolucionado. Pueden ser cuerpos de defensa personal integrados por escoltas y guardaespaldas, como los que mantenían durante los años setenta y ochenta; bandas de sicarios al servicio de los carteles, como las que formaron los carteles de Cali y Medellín en los años ochenta y la primera mitad de los noventa; o alianzas estratégicas con grandes grupos armados paramilitares o guerrilleros, que se hicieron más frecuentes desde el comienzo de los noventa, con la entrada de lleno al negocio de las FARC y las AUC. Hoy estos aparatos de defensa dependen en mayor medida de la acción de diversos grupos armados ilegales, en particular, de bandas criminales que trabajan para narcotraficantes o en asociación con ellos.

Esto coincide con el análisis antropológico de Silva de Sousa (2004), para quien el funcionamiento del narcotráfico depende de tres fenómenos estructurales: uso racionalizado de la violencia ilegítima, corrupción y "valor confianza", el cual alude a los vínculos estrechos, a veces de parentesco y amistad, que respaldan las

transacciones ilegales. De acuerdo con este autor, "el uso agresivo de la fuerza física (violencia) *ilegítima* (desde el punto de vista estatal) es la regla, e incluso representa uno de los medios predominantes para hacer cumplir los contratos entre los agentes del sistema de comercio ilícito». Y afirma que la corrupción es un recurso para hacer cumplir los acuerdos entre los agentes del negocio ilícito, por lo que es "también otro punto diferencial en la relación social que predomina en [...] la economía ilícita y en las redes informales de transacciones económicas".

### Redes: notas históricas

Una red se puede pensar como un conjunto de puntos y un conjunto de líneas que los unen. En ese sentido, en una red del narcotráfico, los puntos son los narcotraficantes y hay una línea que une a un narcotraficante con otro si, por ejemplo, han hablado por teléfono, o si se les ha visto en una reunión, entre otras posibilidades.

Las redes del narcotráfico han sido estudiadas recientemente (Pichardo y de la Peña, 2018; Morselli, 2009) con las técnicas desarrolladas en lo que se conoce como análisis de redes sociales (*ars* o *sna*, por sus siglas en inglés). El *ars* se remonta a mediados del siglo pasado, cuando un grupo de sociólogos comenzaron a usar este tipo de modelos para caracterizar las interacciones dentro de grupos sociales (Kolaczyk y Csárdi, 2014). Sin embargo, el análisis matemático de redes tiene sus antecedentes en los trabajos de Kirchoff sobre circuitos eléctricos, y en las estruc-

turas moleculares en química con Cayley y Sylvester en el siglo XIX.

El término *redes complejas* fue acuñado en el estudio de los sistemas dinámicos o complejos, y desde hace unos años ya se habla de una *ciencia de las redes* (Barabási, 2016).

A las redes relacionadas con narcotráfico también se les llama *redes oscuras* (Duijn y Klerks, 2014), ya que no solo son redes sociales operando en contextos criminales, sino que deben considerarse los arreglos que las mantienen encubiertas y las interacciones fuera y dentro de la red. Las redes del narcotráfico han sido exploradas con distintos alcances, en buena medida por lo complicado de tener datos confiables y las limitantes inherentes a los mismos. Aunque internacionalmente ya hay varios trabajos de investigación sobre estas redes (Agrestre et al, 2016; Duijn y Sloot, 2015; Bright y Delaney, 2013), donde se muestra la conveniencia de analizar estas redes desde una perspectiva más matemática. En el caso de México, la información es más limitada pero ya hay algunos primeros resultados (Espinal-Enríquez y Larralde, 2015; Dell, 2015).

En este trabajo consideramos con cierto detalle el modelo de Raffo y Segura (2015), que es el más completo que conocemos sobre el funcionamiento de las redes de narcotráfico. Intentaremos dar cuenta de resultados de aplicar este modelo a la realidad mexicana (mientras Raffo y Segura lo aplican en Colombia). Las diferencias más importantes se encuentran en las bases teóricas del modelo y su justificación, pues en lugar de encontrar

condiciones para el equilibrio de Nash en la solución del modelo, calculamos más simplemente el radio espectral de ciertas matrices. En su momento indicaremos dónde se hallan estas diferencias.

### El modelo

Como redes de crimen organizadas, las del narcotráfico tienen dos componentes: una subgráfica de producción y tráfico, y otra de defensa y corrupción. Por sencillez, se supone que en el primer componente solo se encuentran los productores y traficantes –a quienes llamamos *narcotraficantes*–, y, en el segundo, diversos agentes de defensa y corrupción (que en adelante solo llamaremos *agentes*). No obstante, en la realidad no es raro que algunos agentes pertenezcan al mismo tiempo a ambos tipos de redes.

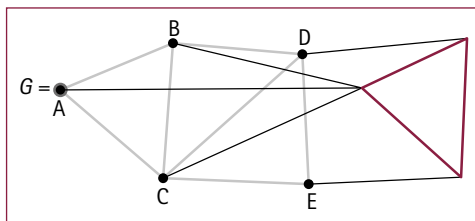
Las relaciones laborales entre narcotraficantes y agentes corresponden a un tercer subgrafo: una red bipartita que muestra las interacciones estratégicas entre estos dos tipos de personas. Se supone que los agentes trabajan para los narcotraficantes haciendo diferentes tareas ligadas a los aparatos de defensa, a los dispositivos de coerción, a los dispositivos de corrupción o a combinaciones de estos. Esto es realista, pues aunque son actividades ilegales, el trabajo en esas actividades generalmente es asalariado (Martín, 2008).

Es clave entender que las relaciones laborales entre los narcotraficantes y los agentes están mediadas por vínculos sociales basados en la confianza y la lealtad, de modo que aunque todos los agentes son potencialmente contratables, solo los que

mantienen vínculos sociales con el narco-traficante terminan siendo sus empleados.

El ejemplo 1 deberá aclarar estas nociones. Las líneas grises constituyen la gráfica de producción y tráfico, el triángulo verde, la gráfica de defensa y corrupción, finalmente, las aristas negras constituyen la gráfica bipartita de las relaciones entre las dos primeras.

### Ejemplo 1



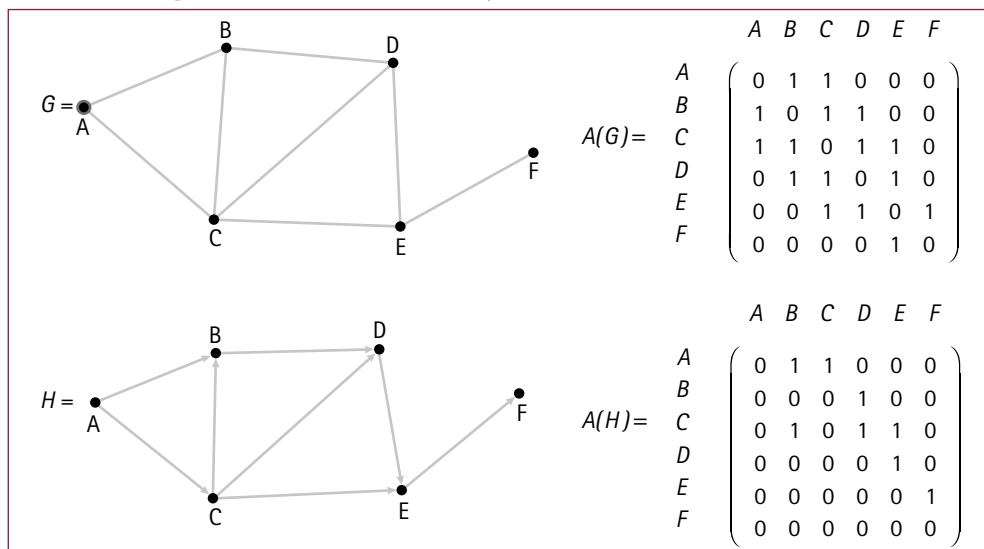
### Algunas nociones teóricas sobre redes

Una red también se puede ver como un objeto matemático, llamado *gráfica*. Más formalmente, una gráfica  $G = (V, E)$  consiste de un conjunto de vértices o nodos  $V$  y un conjunto  $E$  de pares de vértices, llamados aristas (enlaces). En la figura 1 se muestran dos gráficas, la  $G$  y la  $H$ ; las dos tienen el mismo conjunto de vértices, pero no el mismo conjunto de aristas. La diferencia entre las aristas radica en que la gráfica  $G$  es no dirigida, entonces la arista

$(A, B)$  es igual a la arista  $(B, A)$ , mientras que la gráfica  $H$  es dirigida; en este caso la arista  $(B, A)$  ni siquiera existe, mientras que la arista  $(A, B)$  sí.

Un concepto fundamental para estudiar una red o una gráfica es el de *matriz de adyacencia*; en la figura 1 se observan las matrices de adyacencia de cada gráfica. Si las gráficas no tienen aristas repetidas entre dos nodos y no hay aristas que inician y terminan en un mismo nodo (llamados lazos), la gráfica se llama *simple*. La *matriz de adyacencia*  $A$  de una red

Figura 1. Gráficas con sus respectivas matrices de adyacencia



simple es la matriz con elementos o entradas tales que

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si hay una arista entre el} \\ & \text{vértice } i \text{ y el vértice } j \\ 0 & \text{si no la hay} \end{cases}$$

En adelante, el número de nodos de una red  $G$  se denotará por  $N(G)$  y el número de enlaces por  $E(G)$ . El *grado* de un vértice es el número de conexiones que tiene. Por ejemplo, en  $G$  (figura 1) el grado del nodo A es 2, porque tiene dos aristas y el grado de C es 4. Como notación, el grado del  $i$ -ésimo nodo se denotara como  $d(i)$ ; entonces el grado de D en  $G$  se puede escribir como  $d(D) = 3$ . En el caso de las

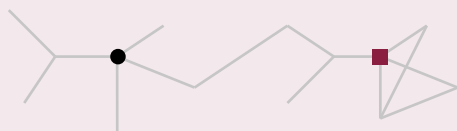
redes dirigidas, hay dos tipos de grado: de entrada ( $d^+$ ) y de salida ( $d^-$ ).

Decimos que una red es de *mundo pequeño*, si se puede llegar en pocos pasos desde un nodo a otro en la red, entendiendo pasos como las aristas que hay que recorrer para ir de un vértice al otro. Por ejemplo, en febrero de 2016, Facebook publicó que con solo 4.57 pasos (en promedio) se puede llegar de una persona a otra en el "mundo Facebook"; para esa fecha había 1.59 billones de usuarios.<sup>1</sup>

Esa *distancia promedio* se denota por  $\langle l \rangle$  y se calcula como:

$$\langle l \rangle = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^N l_{ij}$$

**Figura 2.** ¿Cuál nodo es más pesado?



Una red, en sentido matemático, está formada por nodos unidos por aristas. Cada nodo tiene un "peso" diferente en la red, de acuerdo con el papel del nodo en la conectividad de la red. El peso del nodo se determina de acuerdo con un teorema de álgebra lineal, conocido bajo el nombre de Teorema de Perron. En la red dibujada, el nodo marcado con el cuadrado tiene el mayor peso, seguido por el nodo marcado por el círculo. El peso de los nodos en la red de *links* entre las páginas de Internet es la base del cálculo que hace *Google* para establecer sus respuestas a consultas. Este criterio puede usarse también para la toma de decisiones: ¿dónde construir una estación de trenes importante en la red ferroviaria?, ¿dónde colocar un laboratorio nacional que dé servicio a instituciones de una región?

Esto es, se toman las distancias de todas las longitudes y luego se divide entre el máximo de aristas que puede haber en una red. En el caso de la red  $G$  de la figura 1 se tienen ocho caminos de longitud 1, cinco de longitud 2 y dos de longitud 3; la suma de las distancias es veinticuatro, luego solo hay que dividir entre quince y se tiene  $\langle l \rangle = 1.6$ .

En Facebook hay miles de millones de nodos y  $\langle l \rangle = 4.57$ . En 2011, se hizo un cálculo similar y se encontró que  $\langle l \rangle = 4.74$ , pero con la mitad de usuarios,<sup>2</sup> y en ese mismo reporte se mostró que, en 2008,  $\langle l \rangle = 5.28$ , lo que indica que a

1 S. Edunov et al. Disponible en <https://research.facebook.com/blog/three-and-a-half-degrees-of-separation/>

2 J. Ugander et al. (2011). The Anatomy of the Facebook Social Graph, *arXiv*.



medida que la red crece la distancia promedio decrece.

Evidentemente, estudiar el fenómeno del mundo pequeño en las redes del narcotráfico es fundamental, porque permite identificar qué tan rápido se puede llegar de un individuo a otro. Una aproximación muy sencilla, partiendo del modelo de red aleatoria de Erdős-Ranyi, es que una red es de mundo pequeño si

$$\langle l \rangle \approx \frac{\ln N}{\ln \langle d \rangle}$$

Donde  $\ln x$  denota el logaritmo natural de  $x$ . Por ejemplo, si la red  $G$  es regular con  $d(x)=3$  para cada vértice  $x$ , entonces  $\langle d \rangle = 3$  y  $\ln 3 = 1.098$ . En ese caso,  $\langle l \rangle$  es aproximadamente  $= \ln N$ ; a medida que la red crece, la distancia promedio también crece.

### Los supuestos

¿Quiénes participan en las redes del narcotráfico? Los narcotraficantes y todos los agentes que trabajan para ellos, a quienes también llamamos agentes de defensa y corrupción. Como dijimos antes, estos agentes suelen realizar sus actividades de defensa, coerción y corrupción como asalariados, y se pueden catalogar como informales, porque la ley y el Estado no protegen estas actividades por su ilegalidad. Obviamente, la ilegalidad de estas actividades asalariadas nada tiene que ver con el tamaño de las organizaciones, pues son empresas que en el conjunto de toda la cadena productiva pueden tener gran escala, muchas veces de índole trasnacional.

Sea  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  el conjunto de narcotraficantes y agentes de la red. El grafo de toda la red se denota  $(N, V)$ , donde  $N$  es el conjunto de nodos de la red y  $V$  el conjunto de vínculos entre ellos (en adelante se denota como  $g$ ). Cuando un par de agentes  $i$  y  $j$  están conectados,  $g_{ij} = 1$ , de lo contrario están desconectados y  $g_{ij} = 0$ . Por convención, se supone que  $g_{ij} = 0$ , y que los vínculos son recíprocos; de modo que  $g_{ij} = g_{ji}, \forall i, \forall j \in g$ . Es conveniente definir una partición  $N = \{N_T, N_D\}$  que separa el subconjunto de narcotraficantes (denotados  $1, 2, \dots, n$ ) en  $N_T$  de  $N_D$  (denotados  $1', 2', \dots, n'$ ) conjunto de agentes. Se supone que  $N_T \geq 1$  y que  $N_D \geq 2$ , de modo que  $n \geq 3$ . Sea  $(N_T, V_T)$  el sub grafo que representa las relaciones sociales de los narcotraficantes entre sí, y que se denota también como  $g^T$ . Frecuentemente se supone que este grafo es completo, un *clique*, de modo que  $\forall i, \forall k \in g^T, g_{ik} = 1$ . Formalmente,  $g^T = \{ik \in g \mid i, k \in N^T\}$ . Sea  $N_i(g^T) = \{k : g_{ik} \in g^T\}$  la vecindad del narcotraficante  $i$  en  $g^T$ . Si este subgrafo constituye un clique,<sup>3</sup>  $d_T(i) = N_T - 1 \geq 1, \forall i \in N_T$ .

Por su parte,  $(N_D, V_D)$  es el subgrafo que representa las relaciones sociales de los agentes entre sí, y que se denota como  $g^D$ . Finalmente,  $(\{N_T, N_D\}, V_b)$  es el grafo bipartito que describe las relaciones sociales entre narcotraficantes y agentes. Este subgrafo se denota también como  $g^b$ . Se supone que cualquier agente está conectado con al menos un narcotraficante, de modo que  $d^b(j) \geq 1, \forall j \in N_D$ . Se

<sup>3</sup> Clique=subgráfica completa; es decir, todos sus vértices están relacionados de manera simple.

supone también que cada narcotraficante está conectado con al menos un agente, de modo que  $d^b(i) \geq 1, \forall i \in N_T$ .

Se supone que toda la cadena productiva de las actividades ilícitas está al mando de los narcotraficantes. La función de ganancias esperadas que un narcotraficante  $i$  está dada por:

$$E[i] = \sum_{j=1}^n [\rho(1-z)\Pi g_{ij}q(j)] - su(i) - w(i) \sum_{j'=1}^{n'} e_{j'}(i)g_{ij'} - (1-\rho)[w(i) \sum_{j'=1}^{n'} e_{j'}(i)g_{ij'}] \quad \dots(1)$$

donde  $\rho$  es la *probabilidad de supervivencia* del narcotraficante, y  $(1-\rho)$  la probabilidad de ser asesinado;  $\Pi$  es el *precio de las drogas*, que se supone dado;  $q(i)$  es la *cantidad de drogas* que vende  $i$ , en particular,  $\sum_{j=1}^n g_{ij}q(j)$  es la cantidad de droga que  $i$  vende a los otros narcotraficantes (aquí, hacemos  $g_{ij}=1$ );  $s$  es el *salario* que paga a los trabajadores que laboran directamente en la producción de estupefacientes en cualquier eslabón de la cadena, y también se supone dado;  $u(i)$  es la cantidad total de *trabajadores "productivos"* que contrata  $i$ . La variable  $z$  es la *probabilidad de interdicción y destrucción de las drogas*; el gobierno controla esta variable de política y que se supone exógena. En consecuencia,  $1-z$  es la proporción de producción ilícita que sobrevive a las políticas de restricción y, en particular, de interdicción y destrucción de drogas. La razón por la que  $\Pi$  y  $s$  se suponen dados es que es razonable considerar que la estruc-

tura mercantil de estos mercados –ligada a la tecnología de producción y tráfico de drogas– es competitiva y tiene barreras a la entrada. Llamamos al  $\Pi' = \rho(1-z)\Pi$  *precio final* de la droga.

Por otro lado,  $w(i)$  denota el salario que  $i$  paga a los agentes que contrata;  $e'(i)$  es el vector  $(e_1(i), \dots, e_{n(d)}(i))$  del *nivel de esfuerzo* de cada agente contratable para un narcotraficante, de modo que  $e_{j'}(i)g_{ij'}$  capta el esfuerzo realizado por  $j'$  para  $i$ , dada la posible existencia de un vínculo social entre  $i$  y el agente  $j'$ ; en consecuencia, si  $g_{ij'}=1$  se activa un vínculo laboral entre  $i$  y  $j'$ , en caso contrario  $g_{ij'}=0$ . Aquí,  $e'(-i) = (e_1(-i), \dots, e_{n(d)}(-i))$  es el vector del nivel de esfuerzo de los agentes para con los demás narcotraficantes. Aunque estos niveles de esfuerzo no aparecen explícitamente en la función de ganancias de los narcotraficantes, como se verá más adelante,  $\rho$  depende de estos.

Los costos en trabajo "productivo",  $s$   $u(i)$ , no entran en el costo esperado de ser eliminado  $i$ , porque el modelo se limita a las decisiones de defensa y corrupción. En este modelo no se analizan las decisiones de producción, sino solo las transacciones laborales básicas para el funcionamiento de la tecnología para el conflicto y la corrupción del narcotráfico.

El mercado requiere  $(A q)(i)$  unidades de droga distribuidas a través de los narcotraficantes  $i$ . Para el "mercado externo" quedan

$$y(i) = \Pi'(q - A q)(i) - (s u)(i) + (\rho - 2)w(i) \sum_{j'=1}^{n'} e_{j'}(i)g_{ij'} \quad \dots(2)$$

unidades de droga, a razón de  $\Pi'$  dólares (u otra unidad monetaria) por unidad, a ser distribuidas por los distintos  $i$ . ¿Cuándo existen soluciones de esta ecuación?

El *problema de sustentabilidad* es saber cuándo es  $y \geq 0$ , siendo  $q \geq 0$ . Obsérvese que en la producción de drogas que determinan las  $q(i)$  no se incluyen las elecciones de demanda de trabajo productivo ni el efecto directo del aparato de defensa. Es decir, no se modela la lucha por el dominio de la tierra entre los narcotraficantes y el gobierno ni la de los narcotraficantes entre sí. Por ello, se supone que el término

$$\sum_{j=1}^n [q - A q - \Pi'^{-1} s u]$$

está dado para cada narcotraficante. Como es un mercado competitivo en su componente productivo, se puede suponer que este término –que representa el beneficio neto de la producción de drogas (sin descontar los costos de defensa y corrupción)– es idéntico para todos los narcotraficantes, de modo que

$$(1_n - A)q - \Pi'^{-1} s u = q - A q - \Pi'^{-1} s u = q_0 1_n,$$

para alguna  $q_0 > 0$ . Ahora bien,  $A$  es una matriz invertible con *radio espectral*

$$\rho(A) = (\text{máximo}\{\mu \mid \mu \text{ valor propio de } A\}).$$

Si  $\rho(A) < 1$ , entonces  $1_n - A$  es invertible. En ese caso,

### Caminos en una gráfica

Dada una gráfica  $G$  con matriz de adyacencia  $A(G) = (a_{xy})$  de tamaño  $n \times n$ , el número de vecinos  $c(x) = \sum_j a_{xy}$  de  $x$  es la suma total del renglón  $x$ , de manera que el promedio del número de vecinos es

$$c(S) = \frac{1}{n} \sum_{x,y=1}^n a_{xy}$$

Llamamos  $a_{xy}^{(k)}$  al número de caminos de longitud  $k$  que van de  $x$  a  $y$ . Observemos que se obtienen de la siguiente manera:

$$a_{xy}^{(k+1)} = \sum_z a_{xy}^{(k)} a_{zy}.$$

Finalmente, las potencias de  $A(G)$  son precisamente  $A(G)^k = a_{xy}^{(k)}$ .

Recordemos que el *número de Dunbar* de  $G$  es  $D(G) = \max\{c(x) \mid 1 \leq x \leq n\}$ . Mostraremos por inducción sobre  $k$  que:

$$\max\{a_{xy}^{(2k)} \mid 1 \leq x, y \leq n\} \leq D(G)^k$$

En efecto, para  $k = 1$ ,

$$a_{xy}^{(2)} = \sum_z a_{xz} a_{zy} \leq \sum_z a_{xz} \leq c(x) \leq D(G).$$

Supongamos el resultado cierto para  $k$ , entonces calculamos para  $k+1$ :

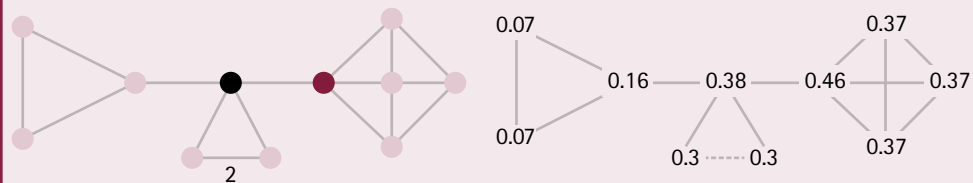
$$a_{xy}^{(2k+2)} = \sum_z a_{xz}^{(2k)} a_{zy}^{(2)} \leq D(G)^k c(y) \leq D(G)^{k+1}.$$

$$(1_n - A)^{-1} = 1_n + \sum_{k=1}^{\infty} \rho(A)^k A^k$$

es una serie convergente y estrictamente positiva. Entonces,  $0 < (1_n - A)q - \Pi'^{-1} s u$ , si y sólo si,  $\Pi'^{-1} s u < (1_n - A)q$ , si y sólo si,  $s(1_n - A)^{-1} u < \Pi' q$ .

Muchas conclusiones pueden obtenerse de esta ecuación. Por ejemplo,

Figura 3. Valores propios de la gráfica G



La gráfica G de una red social formada por tres clanes de tamaño 2, 3 y 4 y un individuo (negro) que no pertenece a ningún clan. Consideramos la *matriz de adyacencia*  $A(G)$  de la red con *ecuación característica*

$$x^{10} - 17x^8 - 14x^7 + 90x^6 + 144x^5 - 89x^4 - 338x^3 - 253x^2 - 56x + 4 = 0$$

que tiene soluciones  $r = 3.24, 2.72, 2, 0.56, -1$  con multiplicidad 4,  $-2$  y  $-2.02$ . El *radio espectral*  $r$  tiene un *vector de Perron* asociado  $u$ , cuyas coordenadas (todas positivas) las escribimos sobre los vértices de la gráfica, de manera que

$$A(G)u = ru.$$

Los valores de  $u$  nos llevan a identificar el vértice verde como el *líder* de la red G, seguido en importancia por el vértice negro. Por supuesto, estos cálculos se llevan a cabo con programas de cómputo. Nosotros hemos usado *Maple*.

$$s(1_n + \rho(A)A)u < \Pi'q$$

$$A = \begin{bmatrix} g^T & g^b \\ g^b & g^D \end{bmatrix}$$

que establece una relación entre el salario  $s$  que paga  $i$ , el número de asalariados  $u(i)$  y el monto final obtenido por  $i$  en la venta de droga.

Otro tipo de conclusión que se obtiene, es que la probabilidad de supervivencia  $p$  de  $i$  depende en forma directamente proporcional de los vínculos que los narcotraficantes poseen con los agentes, e inversamente de los vínculos que estos últimos tienen con otros narcotraficantes.

### Solución general

Consideremos la matriz de adyacencia  $A = [g_{ij}]$  que es simétrica y  $A$  se parte en bloques:

Sea  $q = (q(i))$  el vector de cantidad (de droga vendida) y  $w = (w(i))$  donde  $w(i)$  denota el salario que  $i$  paga a los agentes que contrata y  $u(i)$  la cantidad de contratados.

Una solución general de la ecuación (2) se obtiene siempre que:

- a) Se tengan condiciones para que la matriz  $(1_n - A)^{-1}$  exista;
- b) Suponiendo que a) tenga solución, se requiere que

$$y(i) = \Pi'(q - Aq)(i) - (su)(i) + (p-2)w(i) \sum_{j=1}^{n'} e_{j'}(i)g_{ij'} \geq 0.$$

Dado que  $(1_n - A)^{-1}$  es estrictamente positiva,  $p < 1$  y la matriz  $A$  tiene entradas positivas, entonces, la condición b) puede desglosarse en dos condiciones independientes:

$$(b1) \quad \Pi'(q - Aq) \geq s u, \text{ como vectores; y}$$

$$(b2) \quad \Pi'(q - Aq)(i) \geq s u(i) \\ + (2 - p)w(i) \sum_{j'=1}^{n'} e_{j'} g_{ij'}$$

siendo el caso más extremo cuando la red bipartita  $g^b$  es completa, esto es,

$$\sum_{j'=1}^{n'} e_{j'} g_{ij'} = n'$$

(= número de agentes en  $D$ ), para toda  $i$ , cosa que supondremos por el resto de esta sección. Así, (b2) toma la forma,

$$(b3) \quad \Pi'(q - Aq) \geq s u + (2 - p)n' w.$$

De esta ecuación se pueden obtener otras consecuencias.<sup>4</sup>

1. Las ecuaciones indican que cuanto más grande es la densidad media de las redes, menor es el salario que pagan los narcotraficantes.

a) A medida que los agentes tienen más conexiones sociales mutuas entre ellos en  $g^D$ , menores son los salarios que se les pagan, pues cuanto más (menos) interconectados estén entre sí, mayores (menores) son las

externalidades positivas que se generan entre ellos y, en consecuencia, menor (mayor) el costo de su esfuerzo laboral, y mayor (menor) su esfuerzo para un nivel dado de salarios.

b) Cuanto mayor (menor) es el nivel de conectividad promedio de los narcotraficantes con los agentes, menores (mayores) son los salarios que pagan. Este impacto se puede pensar como un efecto de competencia. Cuantos más agentes puede contratar potencialmente un narcotraficante, debido a que tienen vínculos sociales con él, mayor es su disponibilidad de mano de obra y, por tanto, mayor es su poder de mercado y de negociación frente a ellos, por lo que termina pagando menores salarios.

c) Cuanto mayor es el nivel de conectividad promedio de un agente con los narcotraficantes, menor es el salario que devenga, porque para cada narcotraficante la letalidad aumenta cuando un mismo empleado trabaja para más narcotraficantes, y esto tiene un efecto negativo en su probabilidad de supervivencia. Aunque se podría pensar que una mayor conectividad de un agente con los narcotraficantes debería inducir una mayor demanda relativa de mano de obra y por ello mayores salarios, el impacto letal de la mayor conectividad de los agentes con otros narcotraficantes invierte esta relación.

<sup>4</sup> Para estas consecuencias seguimos a L. Raffo L., y J. L. Segura, 2015.

2. Las ecuaciones también muestran que el tamaño de las redes de defensa y corrupción incide en el salario. Los efectos de cambios de  $n$  y  $n^p$  son similares a los analizados en 1.
3. Se puede probar que un aumento (reducción) del beneficio neto de la producción de drogas (sin descontar los costos de defensa y corrupción)  $p$ , provocado por un aumento del precio de la droga aumenta (reduce) los salarios que pagan los narcotraficantes. Una mayor rentabilidad neta del negocio genera incentivos para que los narcotraficantes demanden mayor cantidad de trabajo para mantener sus aparatos de defensa y corrupción. Como resultado, los salarios de equilibrio que pagan a los agentes tienden a subir, es decir, hay una relación directa entre el precios de la droga y los salarios que pagan los narcotraficantes a estos agentes; debido al impacto positivo de un aumento de precios sobre los beneficios netos de la producción de drogas ilegales.
4. El fortalecimiento de la política de represión de las drogas –captado por un aumento de la probabilidad de interdicción y detección– induce una baja en los salarios de los agentes. Este efecto obedece al impacto de un mayor valor de  $z$  sobre  $p$ .
5. Las ecuaciones indican que unas redes de defensa y corrupción más densas llevan inevitablemente a que los narcotraficantes enfrenten menor probabilidad de supervivencia  $y$ , por ello, a la configuración de tecnologías más

inseguras y letales a la vez. La mayor densidad de las redes debilita los sistemas de seguridad de cada narcotraficante, y, al mismo tiempo, mejora su capacidad para emprender acciones ofensivas contra sus rivales, que suelen ser planeadas por los traficantes pero perpetradas por sus agentes.

6. Independientemente de lo indicado por el modelo, el representante de la ONG Semáforo Delictivo insistió en la regulación de las drogas como única alternativa para hacer frente a la violencia extrema y concluyó:

Es momento de resolver el asunto de fondo. Cada droga tiene sus riesgos, no se pueden regular de la misma manera. Es momento de voltear a ver a los países que han reducido radicalmente los daños como Suiza en el caso de la heroína o aquellos que incluso han generado negocios con las drogas de uso terapéutico y medicinal.

7. La discusión anterior pone en relieve la ineficacia de las políticas de represión de la oferta en todo el periodo posterior a los años setenta del siglo pasado. El modelo da luces a ese respecto: una mayor represión de las drogas, captada por una mayor probabilidad de interdicción y destrucción de las drogas, lleva a que los narcotraficantes bajen los salarios que pagan a los agentes. Por ello, a niveles relativamente bajos de densidad de las redes de defensa y corrupción  $y$ , por ende, de letalidad de la tecnología, el aumento de la probabili-

dad de interdicción y destrucción de las drogas reduce la probabilidad de supervivencia de los narcotraficantes. Ocurre lo contrario cuando las redes son relativamente densas y la tecnología es más letal, como sucedió durante la mayor parte de los noventa y al menos la primera mitad de la pasada década. Por esa razón, la política de represión a la drogas es más efectiva en el primer caso, porque reduce la probabilidad de supervivencia de los narcotraficantes.

8. El modelo corrobora la existencia de una relación directa entre los salarios pagados a los agentes y los precios de la droga. Aunque los precios se suponen dados, si se relaja este supuesto y se supone que los precios son afectados por cambios en los salarios, se tiene una explicación del descenso promedio en el largo plazo de los precios de la cocaína y la heroína durante las tres últimas décadas.

### El problema se diversifica

La historia "romántica" de la droga en México cuenta que Lai Chang Wong, un inmigrante chino que nació alrededor de 1869 en Hong Kong y que llegó a México en 1911, es uno de los precursores del cultivo de amapola y otras drogas, principalmente en Sinaloa. De inicio llegó a Estados Unidos y luego viajó a México, donde durante 10 años brindó sus servicios en el Ejército, pero un balazo lo obligó a dejar la lucha y comenzó a practicar medicina naturista en la sindicatura de El Dorado, Sinaloa. Ahí un sacerdote lo convirtió al cristianismo y lo bautizó como José Ama-

rillas. Debido a que el hombre tenía conocimientos en medicina, José Amarillas puso un consultorio en el pueblo de San José de la Puerta, en Badiraguato y ahí se desempeñó como "curandero". Para sus remedios, José Amarillas comenzó a cultivar diversas verduras y unas flores que ahora son conocidas como amapola.

De acuerdo con el portal *Unión Jalisco*, uno de los mitos en torno a los inicios del narco en México señala que existió un pacto para la producción de estupefacientes con y para Estados Unidos. Pacto que se usó para la producción de droga para el ejército estadounidense hasta los años sesenta en Vietnam. En la siguiente década, México, bajo la presión de la presidencia de Richard Nixon, inició la guerra contra las drogas, enviando al ejército a erradicar plantíos en el norte del país, como parte de la famosa Operación Cóndor. Esa guerra de manera intermitente es la que todavía vivimos en nuestros días y que produjo los años más sangrientos de la historia posrevolucionaria en México, en 2017 y 2018.

El estadounidense es un mercado lucrativo para las drogas ilegales. Las Naciones Unidas estiman que el 90% de la cocaína que se vende en Estados Unidos proviene de Sudamérica y pasa por México. Eso, sin contar que México es el proveedor principal de marihuana y heroína en Estados Unidos. La mayor parte de las metanfetaminas vendidas en ese país se producen en laboratorios mexicanos de uno y otro lado de la frontera.

La cadena del contrabando de drogas ilegales, que va desde los plantíos hasta el narcomenudeo en las calles, crea la

"economía del *narco*" que genera ingresos para entre 800 mil y un millón de mexicanos que se ocupan en ese tipo de actividades. Cifras del Departamento de Estado de Estados Unidos afirman que en la esfera del crimen organizado "la venta de drogas ilegales genera a los *cárteles* mexicanos ingresos brutos anuales del orden de 600 mil millones de pesos". Para poner la cifra en perspectiva, las remesas familiares representan para México un ingreso de divisas del orden de 22 mil millones de dólares al año, de acuerdo con cifras del Banco de México.

Los negocios ilegales se mezclan: el robo de combustible o *huachicoleo*<sup>5</sup> a Pemex se volvió en los últimos años un problema creciente y atractivo para las bandas criminales, ya que mientras en 2003 la petrolera reportó 152 tomas clandestinas, entre enero y octubre del año pasado, la cifra se elevó a 12 581, a las que hay que sumar el robo de pipas.

En los últimos 15 años, Pemex reportó 46 717 tomas clandestinas en diversos estados, ilícito que genera pérdidas a la petrolera, las cuales el gobierno actual estima en 60 mil millones de pesos anuales, producto del crimen organizado y la complicidad, en su momento, de empleados de la empresa.

---

5 La palabra "huachicol" deriva de los huachichiles o huaches, una etnia emparentada con los huicholes. Significaba originalmente "los colorados" pues pintaban sus cuerpos de color rojo (Amador, 1887). Según la Academia Mexicana de la Lengua, la palabra tiene connotaciones negativas, pues le da el nombre a una bebida con alcohol adulterada, principalmente de caña; sin embargo, este adjetivo tomó otro significado para el país: la gasolina robada.

En la primera década del siglo XXI, Veracruz, Coahuila y Sinaloa fueron las regiones con mayor número de tomas clandestinas, pero la década actual muestra que el negocio del robo de hidrocarburos cobró fuerza primero en Tamaulipas y, después, en Puebla, Guanajuato, Hidalgo y Jalisco. Tan solo de enero a octubre de 2018, Puebla encabezó el *ranking* de tomas, al registrar 1 815, seguida por Hidalgo (1 736), Guanajuato (1 547), Veracruz (1 338), Estado de México (1 268) y Jalisco con (1 263), de acuerdo con datos de Pemex.

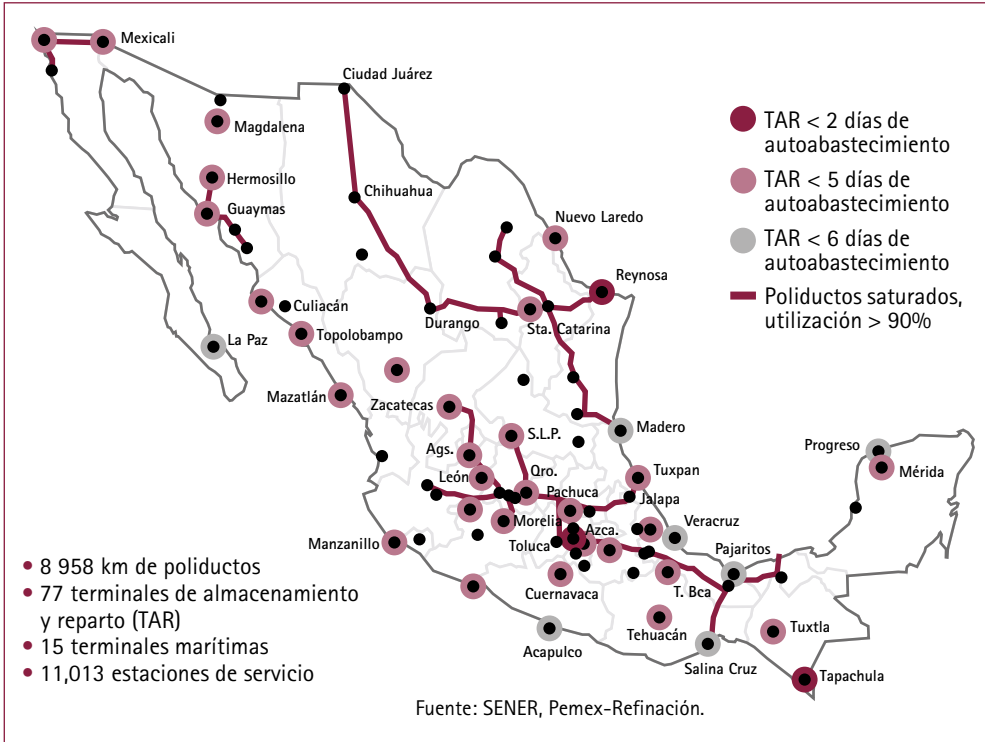
Un analista de la consultoría especializada Gmece señaló que, aunque no hay cifras exactas, estimaciones calculan que el robo diario de combustible en el país alcanza los 40 mil barriles, de los cuales el 50% es producto de las tomas clandestinas y el restante del robo en pipas.

Para el especialista, la pérdida económica de 60 mil millones de pesos puede ser mayor, pues no solo consta del huachicoleo, sino de las mermas que este ilícito genera, ya que el combustible derramado en ocasiones, cuando se perfora el tubo, se contabiliza en este rubro.

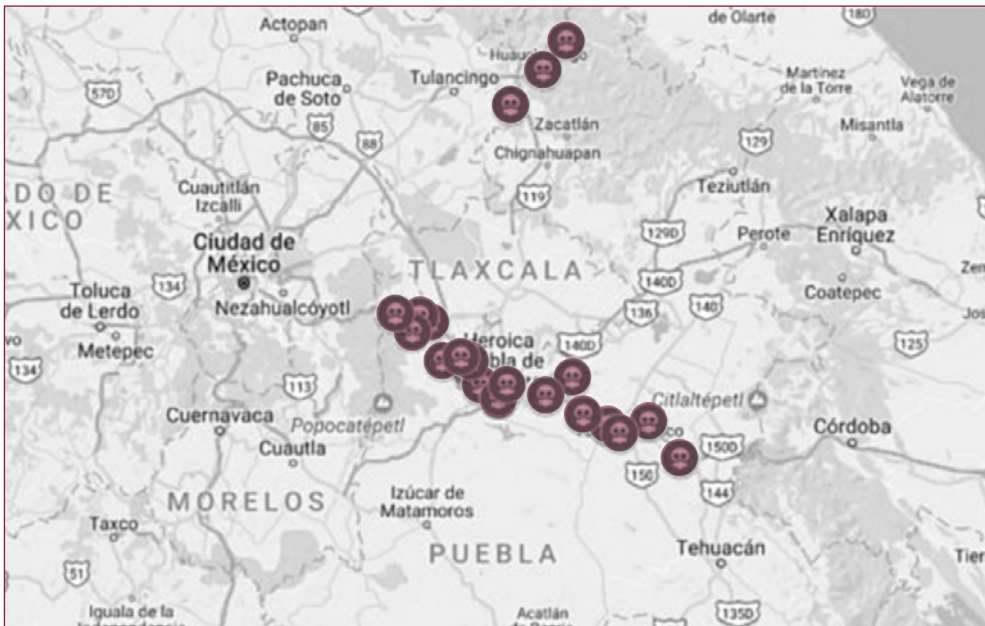
La Comisión Reguladora de Energía (CRE) expone que detrás del problema de huachicoleo está el narcotráfico, grupos armados, bandas criminales de bajo impacto, gasolineros, empleados y ex-empleados de Pemex, autoridades de seguridad pública, empresarios y comunidades. El documento indica que "se sabe que el cártel del Golfo y el cártel de Sinaloa almacenan combustible en sus narco-campamentos, pues en el momento en que las



**Mapa 3. Sistema Nacional de Logística de Petrolíferos**



**Mapa 4. Tomas clandestinas en el área de Puebla**



autoridades han asegurado dichos narco-campamentos, han encontrado combustible almacenado, además de armas de fuego, municiones y equipo táctico". En tanto que en la región Silao-Irapuato-Salamanca, el estudio señala que elementos del cártel Jalisco Nueva Generación sustraen combustible del poliducto Salamanca-Guadalajara (zona que fue intervenida por el gobierno actual).

En una entrevista televisiva, la secretaria de Energía, Rocío Nahle, señaló que, en la zona del Bajío, algunos gasolineros manipulaban sus facturas para registrar la venta de pipas de combustible robado.

Por otra parte, tan solo en 2017 se clausuraron alrededor de 80 estaciones de servicio, las cuales no tuvieron la capacidad de comprobar la procedencia lícita de los combustibles que comercializaban —detalla el reporte anual de Pemex.

Según el presidente López Obrador, "es cosa nada más de cambiar el sistema de distribución, controlar los ductos, porque antes los tenían abiertos por completo, y se ordeñaban los ductos. Ahora se abren y se cierran de acuerdo al control para que no haya fugas, y para que no

se siga manteniendo este mercado negro que daña a la nación". Evidentemente, el problema es mucho más complejo, pues el ecosistema ideal para estos problemas prevalezcan es aquel donde el marco regulatorio y el Estado de derecho son débiles y las autoridades y cuerpos de seguridad corruptibles.

Por lo pronto, con el afán de resolver algunos de los problemas planteados, se pueden desarrollar robots para localizar desperfectos en tuberías de la industria del petróleo.<sup>6</sup> El robot permite explorar tuberías en ambientes explosivos, para encontrar defectos como rajaduras, obstáculos o corrosión mediante inspección visual, lo que, además de evitar fugas de combustible de manera segura, permitiría automatizar la detección de posibles robos.

---

6 Prototipos de estos robots han funcionado ya en Argentina, por ejemplo, donde el director del proyecto indica que "se trata de un dispositivo neumático teleoperado a través de un *software* y que cuenta con una cámara infrarroja que permite ver el interior de la tubería en detalle, lo cual permite ahorrar costos en las inspecciones de cañerías transitoriamente fuera de servicio y evitar los gases inflamables remanentes que suelen concentrarse en su interior".

## Referencias

- Agreste, S., et al. (2016). Network Structure and Resilience of Mafia Syndicates. *Information Sciences*, 351, 30-47.
- Barabási, A. *Network Science*, Universidad de Cambridge, Cambridge, 2016.
- Bright, D. A., y Delaney, J. J. (2013). Evolution of a drug trafficking network: Mapping changes in network structure and function across time. *Global Crime*, 14( 2-3), 238-260.
- Dell, M. (2015). Trafficking Networks and the Mexican Drug War, *American Economic Review*, 105(6), 1738-1779.
- Duijn, P., y Klerks, P. (2014). Social Network Analysis Applied to Criminal Networks: Recent Developments in Dutch Law Enforcement. En A. Masys, *Networks and Network Analysis for Defence and Security*. Cham: Springer.
- Duijn, P., y Sloot, P. (2015). From data to disruption, *Digital Investigation*, 15, 39-45.
- J. Espinal-Enríquez, J., y H. Larralde, H. (2015). Analysis of México's Narco-War Network (2007-2011). *Plus one*, 10(5), e0126503.
- Kolaczyk, E., y Csárdi, G. (2014). *Statistical analysis of network data with R*. Nueva York, EE UU: Springer.
- Martín, D. (2008). *El narcotráfico como fuente de trabajo informal*. (Conferencia). VI Congreso Portugués de Sociología, Universidad Nova de Lisboa, Portugal.
- Morselli, C.. 2009. *Inside Criminal Networks*. Nueva York, EE UU: Springer.
- Pichardo, J. A., y de la Peña, J. A. (2018). Redes complejas. El caso de las redes del narcotráfico. En L. F. Lara, A. Ortega y H. Herlinghaus (eds.), *Narcodependencia. Escenarios heterogéneos de narración y reflexión*. México: El Colegio Nacional.
- Raffo, L., y Segura, J. L. (2015). Las redes del narcotráfico y sus interacciones: un modelo teórico, *Revista de Economía Institucional*, 17(32), 183-212.
- Silva de Sousa, R. (2004). Narcotráfico y economía ilícita: las redes del crimen organizado en Río de Janeiro. *Revista Mexicana de Sociología*, 66(1), 141-164.