



Pauta Auxiliar 5: Simplex y Dualidad

Jueves 21 de Abril de 2011

Pregunta 1

Considere el siguiente problema:

$$\begin{aligned} \text{máx} \quad & x_1 + x_2 \\ \text{s.a.} \quad & -2x_1 + 5x_2 \geq 0 \\ & x_1 + 4x_2 \leq 16 \\ & 4x_1 - 3x_2 \leq 7 \\ & x_1 \geq 0 \\ & x_2 \quad \text{irrestricida} \end{aligned}$$

- Escriba el problema en forma estándar.
- Grafique el problema. Identifique la región factible, los puntos que podría describir mediante una base, cuántos de estos puntos son factibles y el óptimo del problema. ¿Cuánto vale la Función Objetivo en el óptimo? ¿Qué restricción adicional agregaría al problema original para hacer el problema más sencillo sin cambiar la región factible?
- ¿Qué particularidad tiene el origen? ¿Qué bases describen este punto? ¿Es alguna infactible? Compruébelo. ¿Tendría sentido que lo fuera? ¿Necesitaría realizar Fase I para resolver el problema? ¿Por qué no?
- Aplique Simplex partiendo desde el óptimo encontrado en la parte b).

Nota: Para las partes b), c), d) describa o interprete lo que va realizando en forma gráfica.

Solución

- La forma estándar del problema es:

$$\begin{aligned} \text{mín} \quad & -x_1 - x'_2 + x''_2 \\ \text{s.a.} \quad & -2x_1 + 5x'_2 - 5x''_2 - x_3 = 0 \\ & x_1 + 4x'_2 - 4x''_2 + x_4 = 16 \\ & 4x_1 - 3x'_2 + 3x''_2 + x_5 = 7 \\ & x_1, x'_2, x''_2, x_3, x_4, x_5 \geq 0 \end{aligned}$$

donde $x_2 = x'_2 - x''_2$

- Gráficamente
 - Los puntos que se podrían plantear con una base son: A, B, C, D, E, G , que corresponden a la intersección de todas las restricciones del problema. Son en total 6 bases. OJO: Los puntos F y H no se pueden representar con una base, ya que en este problema x_2 es irrestricto, es decir, en esos puntos solo pasa una restricción. El eje está dibujado como referencia, pero en este problema no funciona como restricción como en problemas habituales donde $x_2 \geq 0$.

en simplex!

No es necesario usar fase 1, ya que el origen es un punto factible, como ya se ha demostrado. Fase 1 es un método para encontrar una base inicial factible, cuando el origen no es solución factible del problema.

d) Si agregaron $x_2 \geq 0$.

En el óptimo las variables básicas son $x_B = (x_1, x_2, x_3)$ y as no básicas $x_N = (x_4, x_5)$. Calculamos:

$$A_B = \begin{pmatrix} -2 & 5 & -1 \\ 1 & 4 & 0 \\ 4 & -3 & 0 \end{pmatrix} \quad A_B^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{3}{19} & \frac{4}{19} \\ 0 & \frac{4}{19} & \frac{-1}{19} \\ -1 & \frac{14}{19} & \frac{-13}{19} \end{pmatrix} \quad A_N = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \overline{A_N} = \begin{pmatrix} \frac{3}{19} & \frac{4}{19} \\ \frac{4}{19} & \frac{-1}{19} \\ \frac{14}{19} & \frac{-13}{19} \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} 0 \\ 16 \\ 7 \end{pmatrix} \quad \overline{b} = \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \\ 7 \end{pmatrix}$$

Veamos si el punto es el óptimo del problema, calculando los costos reducidos:

$$\begin{aligned} \overline{c} &= c_N - c_B \overline{A_N} \\ &= (0 \ 0) - (-1 \ -1 \ 0) \begin{pmatrix} \frac{3}{19} & \frac{4}{19} \\ \frac{4}{19} & \frac{-1}{19} \\ \frac{14}{19} & \frac{-13}{19} \end{pmatrix} \\ &= \left(\frac{7}{19} \quad \frac{3}{19} \right) \\ &\geq 0 \end{aligned}$$

Recuerden que c_N y c_B son los coeficientes que acompañan a las variables en la función objetivo EN LA FORMA ESTÁNDAR.

Como ambos costos reducidos son positivos, estamos en el óptimo.

Por lo tanto, el punto óptimo es $x_1 = 4$, $x_2 = 3$, $x_3 = 7$, $x_4 = x_5 = 0$ y con esto $Z = 7$. - Esto sale de recordar que $x_B = \overline{b}$ en cada iteración de simples, entonces:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \\ 7 \end{pmatrix}$$

Si no agregaron la restricción, tienen la forma estándar de la parte a):

En el óptimo, las variables básicas son: $x_B = (x_1, x'_2, x_3)$ y las no básicas son $x_N = (x'_2, x_4, x_5)$.

Calculamos

$$A_B = \begin{pmatrix} -2 & 5 & -1 \\ 1 & 4 & 0 \\ 4 & -3 & 0 \end{pmatrix} \quad A_B^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{3}{19} & \frac{4}{19} \\ 0 & \frac{4}{19} & \frac{-1}{19} \\ 1 & \frac{14}{19} & \frac{-13}{19} \end{pmatrix} \quad A_N = \begin{pmatrix} -5 & 0 & 0 \\ -4 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \overline{A_N} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{3}{19} & \frac{4}{19} \\ -1 & \frac{4}{19} & \frac{-1}{19} \\ 0 & \frac{14}{19} & \frac{-13}{19} \end{pmatrix}$$

$$b = \begin{pmatrix} 0 \\ 16 \\ 7 \end{pmatrix} \quad \overline{b} = \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \\ 7 \end{pmatrix}$$

Veamos si el punto es el óptimo del problema, calculando los costos reducidos:

$$\begin{aligned} \overline{c} &= c_N - c_B \overline{A_N} \\ &= (1 \ 0 \ 0) - (-1 \ -1 \ 0) \begin{pmatrix} 0 & \frac{3}{19} & \frac{4}{19} \\ -1 & \frac{4}{19} & \frac{-1}{19} \\ 0 & \frac{14}{19} & \frac{-13}{19} \end{pmatrix} \\ &= \left(0 \quad \frac{7}{19} \quad \frac{3}{19} \right) \\ &\geq 0 \end{aligned}$$

Como ambos costos reducidos son positivos, estamos en el óptimo.

Por lo tanto, el punto óptimo es $x_1 = 4$, $x'_2 = 3$, $x_3 = 7$, $x'_2 = x_4 = x_5 = 0$ y con esto $Z = 7$.

La interpretación gráfica va por el lado de señalar que, como estábamos comenzando desde el óptimo, es claro que simplex encontrará la solución en una sola iteración. Noten que simplex encuentra el óptimo en

una iteración, pues partimos desde el punto que sabíamos de antemano que era óptimo. Queda propuesto resolver éste problema partiendo desde el origen (punto $(0,0)$). Partan con $X_N = \{X_1, X_2\}$, $X_B = \{X_3, X_4, X_5\}$, la base típica para partir simplex cuando el origen es solución factible. Les ocurrirá que simplex se queda “pegado” en el origen por una iteración, esto ya que el origen es un punto degenerado (es decir, van a intercambiar una variable de X_B con una de X_N , pero la base seguirá representando al origen). Aprovechen de comprobar que en elb les da un valor cero en alguna de sus componentes. Esto siempre es así cuando están en un punto degenerado ;). Noten que como no se movieron del origen, entonces en esa iteración la función objetivo no mejoró, pero en la siguiente si va a mejorar (pues al fin se van a mover hacia otro vértice).

Pregunta 2

Responda:

- a) Dado un problema (P) en forma estándar y x un punto extremo para (P) con no todos los costos reducidos $\bar{c} \geq 0$, entonces x no es óptimo del problema.
- b) Para (P) en forma estándar, toda iteración de simplex mejora estrictamente la función objetivo, o termina con la solución al problema.
- c) Explique, utilizando la notación vista en clases, cómo el algoritmo simplex determina:
 1. El Óptimo de un problema de optimización.
 2. Si una solución es Degenerada.
 3. La existencia de Múltiples Óptimos.
 4. Si el problema es No Acotado.
 5. Solución Factible Inicial.

Solución:

- a) Esto es cierto para soluciones no degeneradas. Para el caso degenerado puede ocurrir que haya una base no óptima asociada a un punto óptimo, por lo que esta base tendrá algún costo reducido negativo que hará que el algoritmo siga iterando hasta encontrar la base óptima.
- b) Esto es cierto para el caso no degenerado. En general, puntos degenerados pueden estar asociados a mas de una base, luego, como Simplex busca el óptimo recorriendo las bases, puede ocurrir que llegue al punto óptimo visitando una de sus bases que no es la base optima, y por lo tanto, debe realizar al menos una iteración extra, en la que no cambia de punto (no mejora la función objetivo) y no se llega necesariamente a la base óptima.
Otro argumento valido es cuando el problema es no acotado. En la ultima iteración, Simplex se da cuenta que no hay ninguna variable básica que cumpla el criterio de salida de la base, y por lo tanto, termina con el resultado “no acotado”, o bien $-\infty$, caso en el que no se llega a la solución optima (no la hay) y no se mejora el valor de la función objetivo.
- c) Explique, utilizando la notación vista en clases, cómo el algoritmo simplex determina:

1. Se considera una base factible B si se cumple lo siguiente es optima:

$$\bar{b} = A_B^{-1}b \geq 0$$

$$\bar{c} = c_N - c_B A_B^{-1} A_N \geq 0$$

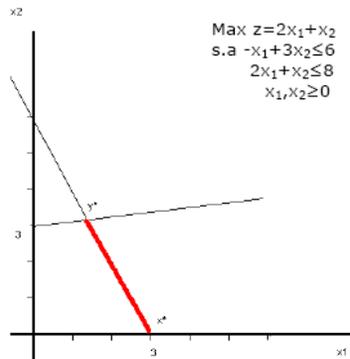
2. Al buscar la variable que sale de la base si se encuentra un empate, es decir, hay dos cocientes de idéntico valor, se tiene una solución degenerada ya que al menos una variable básica tendrá valor cero en la columna de solución (es decir, si ustedes miran el vector \bar{b} y alguno de sus componentes es cero, están en un punto degenerado).

3. La solución final tiene un costo reducido igual a cero asociado a una variable no básica. De esa forma si se incorpora a la base no cambia el valor del óptimo (ver observación más adelante).
4. Se tiene cuando decidimos que la variable x_s entre y no encontramos una que se anule al hacer crecer x_s . Esto se verifica si es $\min_{\overline{a_{i,s}} > 0} \left\{ \frac{\overline{b_i}}{\overline{a_{i,s}}} \right\}$ infactible para algún s porque no existen $\overline{a_{i,s}} > 0$ (ver observación más adelante).
5. Fase I de Simplex: Consiste en agregar tantas variables artificiales como sea necesario para formar una identidad y luego resolver un problema de optimización consistente en tratar de que dichas variables artificiales se hagan nulas y por tanto se puedan eliminar. Si la suma óptima de variables artificiales es nula significa que todas las variables artificiales son nulas y por tanto las podemos eliminar obteniendo un vértice factible:

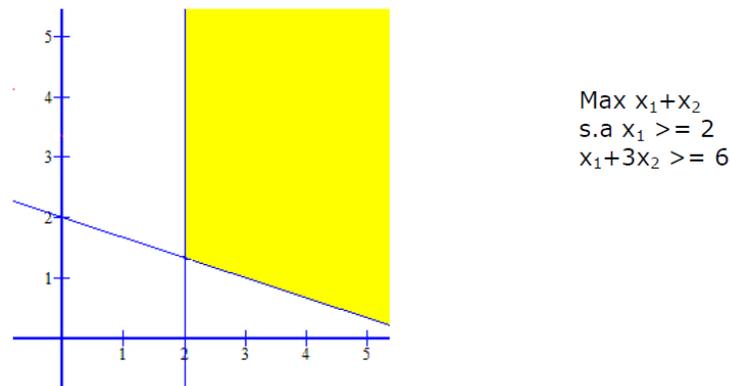
Observaciones: infinitos óptimos y problemas no acotados

A continuación se muestran algunos casos particulares con los que se puede encontrar simplex y cómo el algoritmo los detecta:

Ejemplo 1: Infinitos óptimos: Esto sucede cuando la pendiente de la función objetivo tiene el mismo valor que la pendiente de una de las restricciones. (Son paralelas).



En este caso todos los puntos en el tramo rojo son soluciones óptimas que entregan el mismo valor para la función objetivo. Usando simplex pueden darse cuenta de esto si, al encontrar el óptimo, uno de los costos reducidos es IGUAL a cero (cualquiera). La intuición nos dice que si en el óptimo un costo reducido es cero, es como si pudiéramos meter la variable asociada a la base sin perjudicar ni beneficiar a la función objetivo, por lo tanto podemos saltar a otro vértice y mantener la función objetivo en el mismo valor. Si puedo saltar a otro vértice, entonces todo el tramo recorrido (línea roja) son soluciones óptimas, dadas las características del poliedro (convexo) y función objetivo (convexa). Por ende, existen infinitas soluciones. Ejemplo 2: Espacio no acotado, solución infinita: Como estamos maximizando, podríamos llegar hasta el infinito. Simplex se da



cuenta de esto cuando salta de un vértice al siguiente y éste último está en el “infinito” (i.e. no encuentra el

siguiente vértice). Lo que ocurrirá será que no habrá problemas para decidir que variable entra a la base, pero no encontraremos ninguna variable que salga de la base cumpliendo las condiciones requeridas, i.e. todos los $\bar{a}_{i,s}$ serán menores que cero al hacer la minimización del criterio de salida. Si encontramos esta situación con simplex podemos concluir que el problema es no acotado.

Pregunta 3

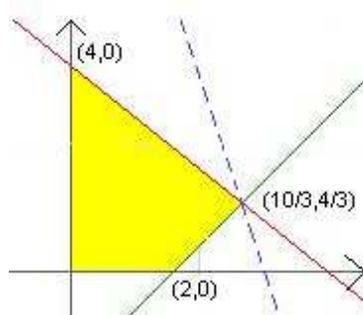
Considere el siguiente problema:

$$\begin{aligned} \text{máx} \quad & 3x_1 + x_2 \\ \text{s.a.} \quad & 4x_1 + 5x_2 \leq 20 \\ & x_1 - x_2 \leq 2 \\ & x_1, x_2 \geq 0 \end{aligned}$$

1. Grafique el problema (D), especificando claramente las restricciones, función objetivo y área factible. Calcule el óptimo.
2. Resuelva el problema utilizando SIMPLEX matricial, comenzando desde el origen.

Solución:

1. El gráfico del problema se muestra a continuación: El punto óptimo es $(10/3, 4/3)$. $z = 11,3$



2. Primero se debe llevar el problema a la forma estándar:

$$\begin{aligned} \text{mín} \quad & -3x_1 - x_2 \\ \text{s.a.} \quad & 4x_1 + 5x_2 + x_3 = 20 \\ & x_1 - x_2 + x_4 = 2 \\ & x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 0 \end{aligned}$$

Comenzamos desde el origen, por lo que las variables no básicas son x_1 y x_2 . Las variables básicas son x_3 y x_4 . Con lo anterior se tiene que:

$$A_B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad A_B^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad A_N = \begin{pmatrix} 4 & 5 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad \overline{A}_N = \begin{pmatrix} 4 & 5 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} 20 \\ 2 \end{pmatrix} \quad \bar{b} = \begin{pmatrix} 20 \\ 2 \end{pmatrix}$$

Veamos si el punto es el óptimo del problema, calculando los costos reducidos:

$$\bar{c} = c_N - c_B \overline{A}_N = (-3 \quad -1) - (0 \quad 0) \begin{pmatrix} 4 & 5 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} = (-3 \quad -1)$$

No estamos en el óptimo pues existen costos reducidos negativos.

Criterio de entrada a la base: Entra la variable con menor costo reducido, entonces entra x_1 .

Criterio de salida de la base: $\min_{\bar{a}_{i,s} > 0} \left\{ \frac{\bar{b}_i}{\bar{a}_{i,s}} \right\} = \left\{ \frac{20}{4}, \frac{2}{1} \right\} = 2$. Luego sale x_4 .

Nota: ¿Por qué es este el criterio de salida?

Recordemos el problema que optimiza simplex, dado una base B , lo podemos escribir de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{mín} \quad & c_B B^{-1}b + (c_N - c_B B^{-1}N)x_N \\ \text{s.a.} \quad & x_B + B^{-1}N x_N = B^{-1}b \\ & x_B, x_N \geq 0 \end{aligned}$$

Anteriormente decidimos que una variable no básica va a entrar a la base mediante el criterio de entrada (o sea, tomar la variable con el costo reducido más negativo). Esto implica que todas las variables en x_N valdrán cero (por definición), excepto aquella que va a entrar a la base, la que dejará de valer cero. En tal caso, los términos que sobreviven en las restricciones son aquellos asociados a la columna de $\overline{A_N}$ asociada a la variable que entra. Para ver esto basta con hacer la multiplicación $\overline{A_N}x_N$ considerando todas las x_N cero, excepto aquella que va a entrar a la base. Así, nos queda (en notación matricial, siendo S la variable que entra):

$$x_B = \overline{b} - \overline{A_s}x_s$$

(donde A_s es solo la columna S de la matriz A , el resto desaparece pues está multiplicado por $x = 0$) y separándolo en m restricciones:

$$\begin{aligned} x_{1B} &= \overline{b}_1 - \overline{A_{1s}}x_s \\ &\vdots \\ x_{mB} &= \overline{b}_m - \overline{A_{ms}}x_s \end{aligned}$$

La pregunta del millón: ¿qué variable x_{iB} es la que PRIMERO se hace cero cuando x_s crece? (recuerden que nos estamos moviendo a un vértice adyacente). Fíjense que x_{iB} vale cero cuando $x_s = \overline{b}_i / \overline{a}_{is}$. Por lo tanto, la primera variable que se hace cero es la que corresponde al mínimo de los $\overline{b}_i / \overline{a}_{is}$, que corresponde al criterio de salida mostrado anteriormente (es decir, x_s va creciendo y cuando llega a cierto valor, algún x_{iB} se hace cero, eso es lo que buscamos... el primero que se hace cero, pues así garantizamos que es un vértice adyacente, se activó una restricción).

Segunda iteración:

Con esto, las nuevas variables básicas son x_3 y x_1 y las no básicas x_4 y x_2 .

Tenemos:

$$A_B = \begin{pmatrix} 1 & 4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad A_B^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & -4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad A_N = \begin{pmatrix} 0 & 5 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad \overline{A_N} = \begin{pmatrix} -4 & 9 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} 20 \\ 2 \end{pmatrix} \quad \overline{b} = \begin{pmatrix} 12 \\ 2 \end{pmatrix}$$

Veamos si el punto es el óptimo del problema, calculando los costos reducidos:

$$\overline{c} = c_N - c_B \overline{A_N} = (0 \quad -1) - (0 \quad -3) \begin{pmatrix} -4 & 9 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} = (3 \quad -4)$$

No estamos en el óptimo pues existen costos reducidos negativos.

Criterio de entrada a la base: Entra la variable con menores costos reducidos, entonces entra x_2 .

Criterio de salida de la base: $\min_{\overline{a}_{i,s} > 0} \left\{ \frac{\overline{b}_i}{\overline{a}_{i,s}} \right\} = \left\{ \frac{12}{9} \right\}$. Luego sale x_3 .

Con esto, las nuevas variables básicas son x_2 y x_1 y las no básicas x_4 y x_3 .

Tercera iteración:

$$A_B = \begin{pmatrix} 5 & 4 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad A_B^{-1} = \begin{pmatrix} 1/9 & -4/9 \\ 1/9 & 5/9 \end{pmatrix} \quad A_N = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \overline{A_N} = \begin{pmatrix} -4/9 & 1/9 \\ 5/9 & 1/9 \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} 20 \\ 2 \end{pmatrix} \quad \overline{b} = \begin{pmatrix} 4/3 \\ 10/3 \end{pmatrix}$$

Veamos si el punto es el óptimo del problema, calculando los costos reducidos:

$$\overline{c} = c_N - c_B \overline{A_N} = (0 \quad 0) - (-3 \quad -1) \begin{pmatrix} -4/9 & 1/9 \\ 5/9 & 1/9 \end{pmatrix} = (11/9 \quad 4/9)$$

Como ambos costos reducidos son positivos, estamos en el óptimo.

Por lo tanto, el punto óptimo es $x_1 = 10/3$, $x_2 = 4/3$ y con esto $Z = 11,3$. (esto último recordando que $x_B = \overline{b}$ y $x_N = 0$)

Pregunta 4: Dualidad y THC

Considere el siguiente problema de optimización:

$$(P) \quad \begin{aligned} \text{mín } z &= -3x_1 + x_2 \\ x_1 + x_2 &\geq 0 \\ x_1 - 2x_2 &\geq -6 \\ x_1 + x_2 &\leq 5 \\ 5x_1 - x_2 &\leq 20 \\ x_2 &\geq 0 \end{aligned}$$

- Encuentre una cota inferior al valor óptimo de (P) (z^*) mediante una combinación lineal de las restricciones.
- Formule el problema dual de (P) para encontrar la mejor cota inferior.
- Grafique la región factible de (P) y encuentre el óptimo por inspección (x^*, z^*) .
- Encuentre el óptimo del problema dual (D) usando el Teorema de Holgura Complementaria.
- Reemplace la cuarta restricción por $5x_1 - x_2 \leq 25$ y desarrolle nuevamente $b)$, $c)$ y $d)$. ¿Qué diferencias existen? (PROPUESTO)

Solución:

- Notar que para que efectivamente se encuentre una cota inferior, las primeras dos restricciones deben multiplicarse por un valor no-negativo, mientras que las demás, por un valor no positivo: Escojamos $y = (1, 1, -5, 0)$, luego:

$$\begin{aligned} (x_1 + x_2 \geq 0) \cdot 1 &\implies (x_1 + x_2 \geq 0) \\ (x_1 - 2x_2 \geq -6) \cdot 1 &\implies (x_1 - 2x_2 \geq -6) \\ (x_1 + x_2 \leq 5) \cdot (-5) &\implies (-5x_1 - 5x_2 \geq -25) \\ (5x_1 - x_2 \leq 20) \cdot 0 &\implies (0x_1 + 0x_2 \geq 0) \end{aligned}$$

Sumando las restricciones se obtiene:

$$-3x_1 - 6x_2 \geq -31$$

Y como término a término se tiene que:

$$z = -3x_1 + x_2 \geq -3x_1 - 6x_2$$

Notar que como no sabemos el signo de x_1 , la única forma de asegurarnos de que esta expresión sea una cota inferior a z es igualando el primer coeficiente a -3 . se concluye que:

$$z \geq -31$$

y para cualquier solución que satisfaga todas las restricciones, en particular:

$$z^* \geq -31$$

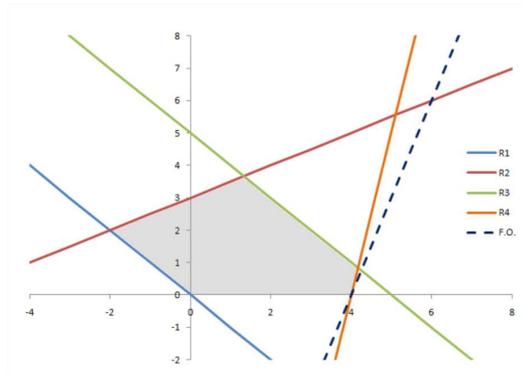
- El problema dual queda:

$$\begin{aligned} \text{máx } w &= -6y_2 + 5y_3 + 20y_4 \\ y_1 + y_2 + y_3 + 5y_4 &= -3 \\ y_1 - 2y_2 + y_3 - y_4 &\leq 1 \\ y_1, y_2 &\geq 0 \\ y_3, y_4 &\leq 0 \end{aligned}$$

- La función objetivo maximiza el valor de la cota formada con el lado derecho de las restricciones.
- La primera restricción obliga a que el coeficiente de x_1 sea igual a -3 , para asegurar que sea una cota inferior. (no sabemos el signo de x_1)
- La segunda restricción obliga a que el coeficiente de x_2 sea menor o igual a 1 , para asegurar que sea una cota inferior. (sabemos que $x_2 \geq 0$)
- $y_1, y_2 \geq 0$ para conservar el sentido de la desigualdad (necesitamos que el lado derecho sea menor al lado izquierdo, para que sea cota inferior)
- $y_3, y_4 \leq 0$ para cambiar el sentido de la desigualdad (necesitamos que el lado derecho sea menor al lado izquierdo, para que sea cota inferior)

c) Gráficamente

El óptimo se alcanza en el punto $x^* = (4, 0)$ con un valor óptimo de $z^* = -12$.



d) Teorema de Holgura Complementaria.

$$y_i^* \cdot (a'_i x^* - b_i) = 0 \quad \forall i \quad (1)$$

$$x_j^* \cdot (c_j - y^* A_j) = 0 \quad \forall j \quad (2)$$

Luego (1) implica que:

$$\begin{aligned} y_1^* \cdot (x_1 + x_2 - 0) = 0 &\Rightarrow y_1^* \cdot (4 + 0 - 0) = 0 \Rightarrow 4y_1^* = 0 \Rightarrow y_1^* = 0 \\ y_2^* \cdot (x_1 - 2x_2 - (-6)) = 0 &\Rightarrow y_2^* \cdot (4 + 0 - (-6)) = 0 \Rightarrow 10y_2^* = 0 \Rightarrow y_2^* = 0 \\ y_3^* \cdot (x_1 + x_2 - 5) = 0 &\Rightarrow y_3^* \cdot (4 + 0 - 5) = 0 \Rightarrow -y_3^* = 0 \Rightarrow y_3^* = 0 \\ y_4^* \cdot (5x_1 - x_2 - 20) = 0 &\Rightarrow y_4^* \cdot (5 \cdot 4 + 0 - 20) = 0 \Rightarrow 0y_4^* = 0 \Rightarrow y_4^* \leq 0 \text{ libre} \end{aligned}$$

Luego (2) implica que:

$$\begin{aligned} 4 \cdot (-3 - (y_1^* + y_2^* + y_3^* + 5y_4^*)) = 0 &\Rightarrow y_1^* + y_2^* + y_3^* + 5y_4^* = -3 \\ 0 \cdot (1 - (y_1^* - 2y_2^* + y_3^* - y_4^*)) = 0 &\Rightarrow \text{nada} \end{aligned}$$

Resolviendo el sistema se obtiene que el óptimo se alcanza en el punto $y^* = (0, 0, 0, -3/5)$ con un valor óptimo de $w^* = -12$.

e) Propuesto.