

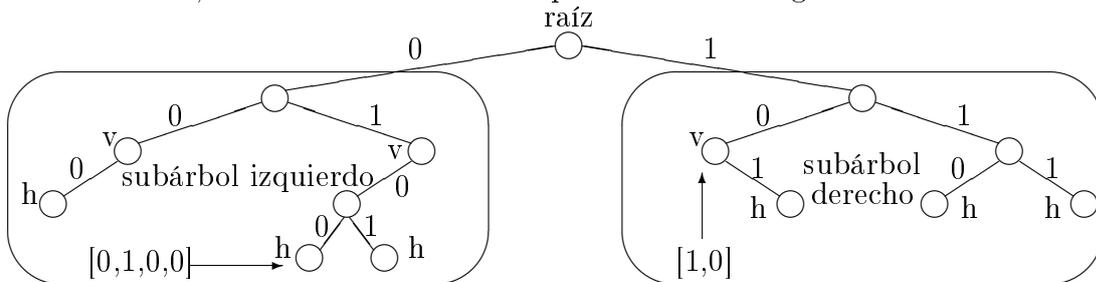
# APUNTES PARA ALGORITMOS Y ESTRUCTURAS DE DATOS II

## PARTE 2: ESTRUCTURAS DE DATOS

### ÁRBOLES BINARIOS

**TAD árbol binario.** Ésta es una estructura muy usada en numerosas aplicaciones. Su nombre y demás terminología aún proviene de los árboles de la botánica, pero sobre todo de los árboles genealógicos. A pesar de que la definición puede generalizarse naturalmente, definiremos sólo los árboles binarios. Un árbol binario puede adoptar una de estas dos formas: o bien es un **árbol vacío** o bien es un **nodo** que, además de un elemento, tiene **dos subárboles** (de ahí el vocablo “binario”). Así, un árbol no vacío tiene una **raíz** (el elemento), un **subárbol izquierdo** y un **subárbol derecho**.

Gráficamente, los árboles binarios se representan de la siguiente forma:



En esta representación, los árboles vacíos no se dibujan, sólo se dibujan los nodos. Uno puede fácilmente deducir dónde se encuentran los árboles vacíos ya que cada nodo debe tener exactamente 2 subárboles. Así, los nodos marcados con una “v” tienen un subárbol vacío, y los marcados con una “h” tienen sus 2 subárboles vacíos.

**TAD árbol\_binario[elem]**

#### constructores

$\langle \rangle$  : árbol\_binario

$\langle \_, \_, \_ \rangle$  : árbol\_binario  $\times$  elem  $\times$  árbol\_binario  $\rightarrow$  árbol\_binario

#### operaciones

raíz : árbol\_binario  $\rightarrow$  elem {se aplica sólo a un árbol no vacío}

izquierdo : árbol\_binario  $\rightarrow$  árbol\_binario {se aplica sólo a un árbol no vacío}

derecho : árbol\_binario  $\rightarrow$  árbol\_binario {se aplica sólo a un árbol no vacío}

es\_vacío : árbol\_binario  $\rightarrow$  booleano

#### ecuaciones

raíz( $\langle i, e, d \rangle$ ) = e

izquierdo( $\langle i, e, d \rangle$ ) = i

derecho( $\langle i, e, d \rangle$ ) = d

es\_vacío( $\langle \rangle$ ) = verdadero

es\_vacío( $\langle l, e, r \rangle$ ) = falso

Un nodo con sus dos subárboles vacíos ( $\langle \langle \rangle \rangle, e, \langle \rangle \rangle$ ) se llama **hoja** (en el ejemplo gráfico, son los marcados con una “h”) y se denota más brevemente  $\langle e \rangle$ . Dado un nodo  $n$ , sus 2 subárboles izquierdo y derecho se denominan usualmente **hijos**, respectivamente **hijo izquierdo** e **hijo derecho** de  $n$ . A su vez,  $n$  se dice **padre** de sus hijos. Dos árboles son **hermanos** cuando son hijo izquierdo y derecho del mismo padre. Un **camino** es una secuencia  $A_1, A_2, \dots, A_n$  de árboles tales que para cada  $i$ ,  $A_{i+1}$  es hijo de  $A_i$ . La **longitud** de este camino es  $n-1$ . Además,  $A_1$  se dice **ancestro** o **ascendiente** de  $A_n$  y  $A_n$  **descendiente** o **subárbol** de  $A_1$ . Decimos que siempre hay un camino de longitud 0 de todo árbol a sí mismo. La **altura** de un árbol es la longitud del camino que va desde él hasta su hoja más lejana. La **profundidad** de un subárbol es la longitud del camino que va desde el árbol hasta él. Se llama **nivel** a todo conjunto de subárboles de igual profundidad.

Intuitivamente, si seguimos la representación gráfica, un camino se puede identificar con un recorrido descendente del árbol. Toda esta terminología (salvo por los términos “izquierdo” y “derecho”) puede ser extendido sencillamente a otras definiciones de árboles, como ternarios (cada nodo tiene 3 hijos), finitarios (cada nodo tiene una cantidad finita de hijos), etc.

Resulta conveniente hablar de las posiciones en que la información puede encontrarse en un árbol. En la representación gráfica dada, se decoró con un “0” la arista que une un nodo con su hijo izquierdo, y con un “1” la que lo une con su hijo derecho. Gracias a ello, una posición cualquiera dentro del árbol puede ser señalada dando una secuencia de 0’s y 1’s. Esta secuencia indica, si uno parte de la raíz, qué subárbol debe elegir (izquierdo o derecho) para llegar hasta la posición indicada. En la representación gráfica se ejemplifican las posiciones indicadas por  $[0,1,0,0]$  y por  $[1,0]$ . Se define el conjunto de posiciones  $\text{pos} = \{\{0,1\}\}$ .

Dado un árbol  $t$  y una posición  $p$ , definimos  $t \downarrow p$  para denotar el descendiente de  $t$  que se encuentra en la posición  $p$  de  $t$ .

$$\begin{aligned} \langle \rangle \downarrow p &= \langle \rangle \\ \langle i, e, d \rangle \downarrow [] &= \langle i, e, d \rangle \\ \langle i, e, d \rangle \downarrow (0 \triangleright p) &= i \downarrow p \\ \langle i, e, d \rangle \downarrow (1 \triangleright p) &= d \downarrow p \end{aligned}$$

Nótese que si  $p$  no está entre las posiciones que aparecen en la representación gráfica de  $t$ , entonces  $t \downarrow p = \langle \rangle$ . Definimos  $\text{pos}(t)$  como el conjunto de posiciones que sí aparecen en la representación gráfica:  $\text{pos}(t) = \{p \in \text{pos} \mid t \downarrow p \neq \langle \rangle\}$ .

Ahora podemos definir la operación  $t.p$  que devuelve el elemento alojado en la posición  $p$  de  $t$ . Esta operación sólo está definida para  $p \in \text{pos}(t)$ .

$$\begin{aligned} \langle i, e, d \rangle . [] &= e \\ \langle i, e, d \rangle . (0 \triangleright p) &= i.p \\ \langle i, e, d \rangle . (1 \triangleright p) &= d.p \end{aligned}$$

o equivalentemente, se puede definir  $t.p = \text{raíz}(t \downarrow p)$ .

Utilizando punteros hay una forma inmediata de implementar árboles binarios, consistente en reemplazar cada arista de la representación gráfica justamente por un puntero:

```

type node = tuple
    lft: pointer to node
    value: elem
    rgt: pointer to node
end

type bintree = pointer to node
fun empty() ret t:bintree
    t:= null
end
{Post: t ~ <> }
{Pre: l ~ L ∧ e ~ E ∧ r ~ R}
fun node(l:bintree,e:elem,r:bintree) ret t:bintree
    alloc(t)
    t→lft:= l
    t→value:= e
    t→rgt:= r
{Post: t ~ <L,E,R>} end
{Pre: t ~ T ∧ ¬ is_empty(t)}
fun root(t:bintree) ret e:elem
    e:= t→value
end
{Post: e ~ raíz(T)}
{Pre: t ~ T ∧ ¬ is_empty(t)}
fun left(t:bintree) ret l:bintree
    l:= t→lft
end
{Post: l ~ izquierdo(T)}
{Pre: t ~ T ∧ ¬ is_empty(t)}
fun right(t:bintree) ret r:bintree
    r:= t→rgt
end
{Post: r ~ derecho(T)}
{Pre: t ~ T}
fun is_empty(t:bintree) ret b:bool
    b:= (t = null)
end
{Post: b ~ es_vacío(T)}

```

Tratándose de estructuras en las que el programador debe administrar la memoria, es conveniente también disponer del destructor correspondiente:

```

{libera todo el espacio de memoria ocupado por t}
proc destroy(in/out t:bintree)
    if  $\neg$  is_empty(t) then destroy(left(t))
                                destroy(right(t))
                                free(t)
                                t:= null
    fi
end

```

La implementación de árbol binario que se acaba de dar no es la única posible, se dió sólo a los fines de ilustrar una posible manera de hacerlo, y otro ejemplo del uso de punteros. De hecho, al presentar heaps, se dará una representación de los árboles binarios totalmente diferente (basada en la utilización de arreglos).

Existen numerosas aplicaciones de árboles binarios. Presentaremos dos de las más interesantes: árboles binarios de búsqueda, para implementar el TAD diccionario, y heaps, para implementar el TAD cola de prioridades.

Si  $T$  es un tipo, resulta conveniente denotar por  $\langle T \rangle$  al tipo de los árboles binarios cuyos elementos son los de  $T$ . Por simplicidad y mayor comprensión, abandonaremos por momentos el pseudo-código que veníamos usando y preferiremos un estilo de programación funcional, utilizando cuando resulte conveniente pattern-matching en vez de las operaciones raíz, izquierdo, derecho y es\_vacío.

**TAD diccionario y árboles binarios de búsqueda.** Un diccionario es un tipo de dato que soporta las siguientes operaciones: creación del diccionario vacío, agregado de un elemento a un diccionario, consulta si el diccionario es vacío, búsqueda de un elemento en el diccionario y borrado de un elemento del mismo.

Se puede especificar como sigue:

**TAD** diccionario[elem]

**constructores**

vacío : diccionario

agregar : elem  $\times$  diccionario  $\rightarrow$  diccionario

**operaciones**

es\_vacío : diccionario  $\rightarrow$  booleano

está : elem  $\times$  diccionario  $\rightarrow$  booleano

borrar : elem  $\times$  diccionario  $\rightarrow$  diccionario

**ecuaciones**

es\_vacío(vacío) = verdadero

es\_vacío(agregar(e,d)) = falso

está(e,vacío) = falso

está(e,agregar(e,d)) = verdadero

$e \neq e' \Rightarrow$  está(e,agregar(e',d)) = está(e,d)

borrar(e,vacío) = vacío

borrar(e,agregar(e,d)) = borrar(e,d)

$e \neq e' \Rightarrow$  borrar(e,agregar(e',d)) = agregar(e',borrar(e,d))

Para poder implementar eficientemente el TAD diccionario, es necesario contar con un orden entre los elementos. Esto permite utilizar árboles binarios de búsqueda (ABB).

Como su nombre lo indica son árboles binarios cuya información ha sido organizada de manera de facilitar la búsqueda de un elemento cualquiera que pueda estar almacenado en el árbol. Para que un árbol binario sea un ABB debe cumplirse, para todo nodo del árbol, que todos los elementos alojados en el hijo izquierdo sean menores que el alojado en el propio nodo, y que éste a su vez sea menor que todos los alojados en el hijo derecho. En símbolos,

$$\text{ABB}(t) \stackrel{\text{def}}{=} \forall p \in \text{pos}(t). \forall q \in \text{pos} \begin{cases} (p \triangleleft 0) \text{ ++ } q \in \text{pos}(t) \Rightarrow t.((p \triangleleft 0) \text{ ++ } q) < t.p \\ (p \triangleleft 1) \text{ ++ } q \in \text{pos}(t) \Rightarrow t.p < t.((p \triangleleft 1) \text{ ++ } q) \end{cases}$$

En un ABB la operación principal es la de búsqueda (llamada “está” en la especificación del TAD diccionario), que en estilo funcional podría definirse:

```
search : T × <T> → Bool                                {se aplica a un ABB}
search(e, <>) = false
search(e, <l, e', r>) = if e < e' → search(e, l)
                       e = e' → true
                       e > e' → search(e, r)
                       fi
```

Si el árbol está balanceado esta operación es del orden de  $\log n$  donde  $n$  es el número de nodos del árbol. Para convencerse de ello, observe que la búsqueda se realiza a lo largo de un camino que parte desde la raíz. Un árbol perfectamente balanceado de altura  $m - 1$  tiene  $n = 2^m - 1$  nodos. Sus caminos tienen a lo sumo longitud  $m$  (o sea, aproximadamente  $\log n$ ).

Otra operación importante es la de insertar (llamada “agregar” en la especificación del TAD diccionario) un nuevo elemento en el lugar correspondiente de manera de que el resultado siga siendo un ABB.

```
insert : T × <T> → <T>                                {se aplica a un ABB}
insert(e, <>) = <e>
insert(e, <l, e', r>) = if e < e' → <insert(e, l), e', r>
                       e = e' → <l, e', r>
                       e > e' → <l, e', insert(e, r)>
                       fi
```

Si el árbol está balanceado esta operación también es logarítmica.

Finalmente definimos la operación borrar que es la más difícil de definir, pues requiere la definición de una función auxiliar que calcule el máximo de un ABB, y otra que lo borre:

```
max : <T> → T                                          {se aplica a un ABB no vacío}
max(<l, e, r>) = if r = <> → e
                r ≠ <> → max(r)
                fi
delete_max : <T> → <T>                                {se aplica a un ABB no vacío}
delete_max(<l, e, r>) = if r = <> → l
                       r ≠ <> → <l, e, delete_max(r)>
```



Las dos funciones que siguen se utilizan para poder luego abstraernos de la operación aritmética que permite obtener las posiciones del hijo izquierdo y del hijo derecho a partir de la del padre.

```
fun left(i:nat) ret j:nat
```

```
  j:= 2*i
```

```
end
```

```
fun right(i:nat) ret j:nat
```

```
  j:= 2*i+1
```

```
end
```

Análogamente, la siguiente función determina la posición  $j$  donde se encuentra el padre de un nodo que está en posición  $i$ .

```
fun parent(i:nat) ret j:nat
```

```
  j:= i ÷ 2
```

```
end
```

En un heap, un nodo puede no tener hijos (cuando es una hoja). La siguiente función dice si el nodo que se encuentra en la posición  $i$  del heap tiene hijos o no.

```
{Pre:  $1 \leq i \leq h.size$ }
```

```
fun has_children(h:heap, i:nat) ret b:bool
```

```
  b:= (left(i) ≤ h.size)
```

```
end
```

```
{Post: b = i tiene hijos en h}
```

Similarmente, un nodo puede no tener padre (cuando es la raíz).

```
fun has_parent(i:nat) ret b:bool
```

```
  b:= (i ≠ 1)
```

```
end
```

Si un nodo tiene hijos, es conveniente poder compararlo (e intercambiarlo) con el mayor de sus hijos. Para ello, la siguiente función devuelve la posición donde se encuentra el mayor de sus hijos. La función asume que el nodo que se encuentra en la posición  $i$  tiene hijos y distingue el caso en que tiene ambos hijos ( $right(i) \leq h.size$ ) o sólo uno.

```
{Pre:  $1 \leq i \leq h.size \wedge has\_children(h,i)$ }
```

```
fun max_child(h:heap, i:nat) ret j:nat
```

```
  if right(i) ≤ h.size ∧ h.elems[left(i)] ≤ h.elems[right(i)] then j:= right(i)
```

```
  else j:= left(i)
```

```
  fi
```

```
end
```

```
{Post: j = posición donde se encuentra el mayor de los hijos de i en h}
```

El procedimiento `lift`, asume que  $i$  tiene padre y modifica el arreglo intercambiando lo que se encuentra en la posición  $i$  con lo que se encuentra en el padre de  $i$ .

```
{Pre:  $1 \leq i \leq h.size \wedge has\_parent(i)$ }
```

```
proc lift(in/out h:heap, in i:nat)
```

```
  swap(h.elems,i,parent(i))
```

```
end
```

A continuación, se define la función booleana `must_lift` que asume que `i` tiene padre y decide cuándo debe ejecutarse el procedimiento anterior.

```
{Pre:  $1 \leq i \leq h.size \wedge \text{has\_parent}(i)$ }
fun must_lift(h:heap, i:nat) ret b:bool
  b:= (h.elems[i] >h.elems[parent(i)])
end
{Post: b = i es mayor que su padre}
```

El procedimiento `float` es el que compara el dato alojado en el nodo `h.size` con los alojados en cada uno de los ancestros de `h.size` hasta encontrarle la posición correcta. Como a lo sumo recorre un camino en un árbol binario balanceado, es en el peor caso del orden de  $\log n$ .

```
{Pre: h (= H) es heap excepto tal vez porque el elem en h.elems[h.size] es grande}
proc float(in/out h:heap)
  var c: nat
  c:= h.size
  while has_parent(c)  $\wedge$  must_lift(h,c) do
    lift(h,c)
    c:= parent(c)
  od
end
{Post: h es un heap con los mismos elementos que H}
```

El procedimiento `sink` es el que compara el dato alojado en el nodo 1 con los alojados en algunos de sus descendientes hasta encontrarle una posición correcta. En cada paso lo compara con el mayor de los hijos. De esta manera, a lo sumo recorre un camino en un árbol binario balanceado. Por ello, en el peor caso es del orden de  $\log n$ .

```
{Pre: h (= H) es heap excepto tal vez porque el elem en 1 es chico}
proc sink(in/out h:heap)
  var p: nat
  p:= 1
  while has_children(h,p)  $\wedge$  must_lift(h,max_child(h,p)) do
    p:= max_child(h,p)
    lift(h,p)
  od
end
```

{Post: h es un heap con los mismos elementos que H}

Estas primitivas facilitan enormemente la tarea de implementar una cola de prioridades utilizando un heap. El tipo `pqueue` resulta sólo sinónimo del tipo `heap`.

```
type pqueue = heap
```

El procedimiento que inicializa la cola de prioridades no presenta novedades.

```
proc empty(out q:pqueue)
  q.size:= 0
end
{Post: q  $\sim$  vacía}
```

El procedimiento enqueue, incrementa el campo size del heap (que al ser incrementado señala la primer celda libre del arreglo) aloja en la primer celda libre el nuevo elemento y finalmente, para restablecer la condición de heap, “hace flotar” el nuevo elemento. La única operación no constante es flotar, por ello enqueue resulta en el peor caso del orden de  $\log n$ .

```
{Pre:  $q \sim Q \wedge q.size < n$ }
proc enqueue(in/out q:pqueue,in e:elem)
    q.size:= q.size+1
    q.elems[q.size]:= e
    float(q)
end
{Post:  $q \sim \text{encolar}(Q,e)$ }
```

La función first es muy sencilla. En un heap no vacío el máximo se encuentra en la raíz, que está en la posición 1 del arreglo.

```
{Pre:  $q \sim Q \wedge \neg \text{is\_empty}(q)$ }
fun first(q:pqueue) ret e:elem
    e:= q.elems[1]
end
{Post:  $e \sim \text{primero}(Q)$ }
```

El procedimiento dequeue elimina el máximo sobrescribiendo la posición 1 del arreglo con lo que se encuentra en la última posición del heap (la señalada por size), decrementa el campo size dado que ahora va a tener un elemento menos y finalmente, para restablecer la condición de heap, “hunde” el elemento que ahora está en la raíz. La única operación no constante es hundir, por ello dequeue resulta en el peor caso del orden de  $\log n$ .

```
{Pre:  $q \sim Q \wedge \neg \text{is\_empty}(q)$ }
proc dequeue(in/out q:pqueue)
    q.elems[1]:= q.elems[q.size]
    q.size:= q.size-1
    sink(q)
end
{Post:  $q \sim \text{dequeue}(Q)$ }
```

Por último, la función is\_empty no presenta ninguna dificultad.

```
{Pre:  $q \sim Q$ }
fun is_empty(q:pqueue) ret b:bool
    b:= (q.size = 0)
end
{Post:  $b \sim \text{es\_vacía}(Q)$ }
```

Además de ser muy ingeniosa, la implementación del heap en un arreglo da lugar a un nuevo algoritmo de ordenación llamado heap\_sort, que utiliza temporariamente como heap el mismo arreglo que se quiere ordenar. El algoritmo consiste de dos etapas. En la primera, el arreglo se va transformando en un heap cada vez más grande a medida que se insertan en él los elementos del arreglo. En la segunda, se van extrayendo los

elementos del heap y colocando en su lugar definitivo en el arreglo. Las operaciones float y sink cambian ligeramente para recibir como parámetros en forma separada el arreglo y el tamaño del heap.

```

proc heap_sort(in/out a:array[1..n] of elem)
  for i:= 1 to n do
    float(a,i)
  od
  for i:= n downto 2 do
    swap(a,1,i)
    sink(a,i-1)
  od
end

```

Mientras el primer **for** coloca uno a uno los elementos del arreglo en el heap, el segundo los extrae y coloca en su lugar. Las celdas que el heap va liberando son justamente las que vuelve a controlar el arreglo a ordenar. No es necesario registrar en una variable aparte el tamaño del heap ya que el mismo es indicado por la variable  $i$  del primer **for**. En el segundo **for**, inmediatamente después del swap, el tamaño del heap es  $i-1$ .

Para completar el heap\_sort necesitamos adaptar (trivialmente) las siguientes funciones y procedimientos definidas sobre heap. Los cambios consisten exclusivamente en adaptar las funciones al hecho de que el heap no está representado por una tupla sino que sus 2 campos están separados.

```

fun has_children(a:array[1..n] of elem, s: nat, i:nat) ret b:bool    {pre:  $1 \leq i \leq s$ }
  b:= (left(i)  $\leq$  s)
end

fun max_child(a:array[1..n] of elem, s: nat, i:nat) ret j:nat {pre: has_children(s,i)}
  if right(i)  $\leq$  s  $\wedge$  a[left(i)]  $\leq$  a[right(i)] then j:= right(i)
  else j:= left(i)
  fi
end

proc lift(in/out a:array[1..n] of elem,in i:nat)
  swap(a,i,parent(i))
end

fun must_lift(a:array[1..n] of elem, i:nat) ret b:bool
  b:= (a[i]  $>$  a[parent(i)])
end

proc float(in/out a:array[1..n] of elem,in i:nat)
  var c: nat
  c:= i
  while has_parent(c)  $\wedge$  must_lift(a,c) do
    lift(a,c)
    c:= parent(c)
  od
end

```

```

proc sink(in/out a:array[1..n] of elem, in s:nat)           {se aplica a  $1 \leq i \leq s$ }
  var p: nat
  p:= 1
  while has_children(s,p)  $\wedge$  must_lift(a,max_child(a,s,p)) do
    p:= max_child(a,s,p)
    lift(a,p)
  od
end

```

Por último, presentamos a continuación la versión de heap\_sort que resultaría si no utilizáramos funciones y procedimientos auxiliares. A los fines pedagógicos la versión anterior es más apropiada, pero la que sigue se parece más a la que suele encontrarse en libros y bibliotecas de programas. Es por eso que decidimos incluirla a continuación.

Se utilizan tres variables locales: p por parent (padre), c por child (hijo) y r por right ((hijo) derecho).

```

proc heap_sort(in/out a:array[1..n] of elem)
  var p,c,r: nat
  for i:= 1 to n do
    c:= i                                     {comienza enqueue(a[i])}
    p:= i  $\div$  2
    while c  $\neq$  1  $\wedge$  a[c] > a[p] do
      swap(a,c,p)
      c:= p
      p:= p $\div$ 2
    od                                       {termina enqueue(a[i])}
  od
  for i:= n downto 2 do
    swap(a,1,i)                               {a[i]:= first, comienza dequeue}
    p:= 1
    c:= 2
    r:= mín(3,i-1)
    while c < i  $\wedge$  (a[p] < máx(a[c],a[r])) do
      if a[c]  $\geq$  a[r] then swap(a,c,p)
        p:= c
      else swap(a,r,p)
        p:= r
      fi
      c:= 2*p
      r:= mín(2*p+1,i-1)
    od
  od
end

```

En el primer **for** se realiza, para cada ejecución del ciclo, la incorporación de un nuevo elemento (a[i]) al heap. El **while** que está dentro de ese primer **for** se encarga de hacer flotar el nuevo elemento. Las divisiones por 2 corresponden a la función parent

que utilizamos anteriormente, la condición del **while** a la conjunción de `has_parent(c)` con `must_lift(a,c)`, la operación `swap` a la llamada al procedimiento `lift`.

El segundo **for** es más complicado. Luego del `swap` (que asigna a `a[i]` su valor definitivo, es decir, deja esa celda ordenada) se realiza el “hundimiento” de la posición `i`. Observar que  $c < i$  exactamente cuando `p` tiene hijo(s), y  $c = i-1$  exactamente cuando `p` tiene 1 hijo, en cuyo caso se cumplirá además  $r = c$ . Este artilugio permite tratar de manera uniforme los casos en que `p` tiene 1 ó 2 hijos. Mientras estemos en uno de esos casos, se compara lo alojado en `p` con lo alojado en el mayor de sus hijos y se intercambian el padre con el mayor de sus hijos. Nuevamente se asigna a `r` una expresión no trivial, con la intención de que  $r$  sea igual a  $c$  en caso de que `p` tenga un único hijo.