

Grupo ARCOS

uc3m | Universidad **Carlos III** de Madrid

Tema 3 (IV)

Fundamentos de la programación en ensamblador

Estructura de Computadores
Grado en Ingeniería Informática



Contenido

- ▶ Fundamentos básicos de la programación en ensamblador
- ▶ Ensamblador del RISC-V 32, modelo de memoria y representación de datos
- ▶ Formato de las instrucciones y modos de direccionamiento
- ▶ Llamadas a procedimientos y uso de la pila

Procedimientos y funciones

```
int factorial(int x) {  
    int i;  
    int r=1;  
    for (i=1;i<=x;i++) {  
        r*=i;  
    }  
    return r;  
}  
...  
r1 = factorial(3) ;  
...
```

- ▶ Un función (procedimiento, método) en alto nivel es un subprograma que realiza una tarea específica cuando se le invoca
- ▶ Recibe argumentos o parámetros de entrada
- ▶ Devuelve algún resultado

Funciones en un lenguaje de alto nivel

Pasos en la ejecución de una función

```
int main() {  
    int z;  
    1 x=3;  
    z=factorial(x);  
    print_int(z);  
}
```

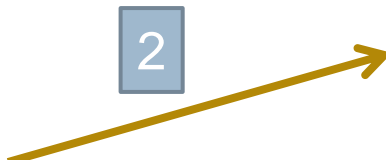
```
int factorial(int x) {  
    int i;  
    int r=1;  
    for (i=1;i<=x;i++) {  
        r*=i;  
    }  
    return r;  
}
```

1. Situar los parámetros en un lugar donde la función pueda accederlos
2. Transferir el control a la función
3. Adquirir los recursos de almacenamiento necesarios para la función
4. Realizar la tarea deseada
5. Guardar el resultado donde la función llamante pueda acceder a él
6. Devolver el control al punto de origen

Funciones en un lenguaje de alto nivel

Pasos en la ejecución de una función

```
int main() {  
    int z;  
    x=3;  
    z=factorial(x);  
    print_int(z);  
}  
  
int factorial(int x) {  
    int i;  
    int r=1;  
    for (i=1;i<=x;i++) {  
        r*=i;  
    }  
    return r;  
}
```



1. Situar los parámetros en un lugar donde la función pueda accederlos
2. Transferir el control a la función
3. Adquirir los recursos de almacenamiento necesarios para la función
4. Realizar la tarea deseada
5. Guardar el resultado donde la función llamante pueda acceder a él
6. Devolver el control al punto de origen

Funciones en un lenguaje de alto nivel

Pasos en la ejecución de una función

```
int main() {  
    int z;  
    x=3;  
    z=factorial(x);  
    print_int(z);  
}
```

3



```
int factorial(int x) {  
    int i;  
    int r=1;  
    for (i=1;i<=x;i++) {  
        r*=i;  
    }  
    return r;  
}
```

1. Situar los parámetros en un lugar donde la función pueda accederlos
2. Transferir el control a la función
3. Adquirir los recursos de almacenamiento necesarios para la función
4. Realizar la tarea deseada
5. Guardar el resultado donde la función llamante pueda acceder a él
6. Devolver el control al punto de origen

Funciones en un lenguaje de alto nivel

Pasos en la ejecución de una función

```
int main() {  
    int z;  
    x=3;  
    z=factorial(x);  
    print_int(z);  
}
```

```
int factorial(int x) {  
    int i;  
    int r=1;  
    for (i=1;i<=x;i++) {  
        r*=i;  
    }  
    return r;  
}
```

Variables locales



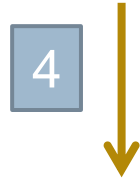
1. Situar los parámetros en un lugar donde la función pueda accederlos
2. Transferir el control a la función
3. Adquirir los recursos de almacenamiento necesarios para la función
4. Realizar la tarea deseada
5. Guardar el resultado donde la función llamante pueda acceder a él
6. Devolver el control al punto de origen

Funciones en un lenguaje de alto nivel

Pasos en la ejecución de una función

```
int main() {  
    int z;  
    x=3;  
    z=factorial(x);  
    print_int(z);  
}
```

```
int factorial(int x) {  
    int i;  
    int r=1;  
    for (i=1;i<=x;i++) {  
        r*=i;  
    }  
    return r;  
}
```



1. Situar los parámetros en un lugar donde la función pueda accederlos
2. Transferir el control a la función
3. Adquirir los recursos de almacenamiento necesarios para la función
4. Realizar la tarea deseada
5. Guardar el resultado donde la función llamante pueda acceder a él
6. Devolver el control al punto de origen

Funciones en un lenguaje de alto nivel

Pasos en la ejecución de una función

```
int main() {  
    int z;  
    x=3;  
    z=factorial(x);  
    print_int(z);  
}
```

```
int factorial(int x) {  
    int i;  
    int r=1;  
    for (i=1;i<=x;i++) {  
        r*=i;  
    }  
    return r;  
}
```


5

1. Situar los parámetros en un lugar donde la función pueda accederlos
2. Transferir el control a la función
3. Adquirir los recursos de almacenamiento necesarios para la función
4. Realizar la tarea deseada
5. Guardar el resultado donde la función llamante pueda acceder a él
6. Devolver el control al punto de origen

Funciones en un lenguaje de alto nivel

Pasos en la ejecución de una función

```
int main() {  
    int z;  
    x=3;  
    z=factorial(x);  
    print_int(z);  
}
```

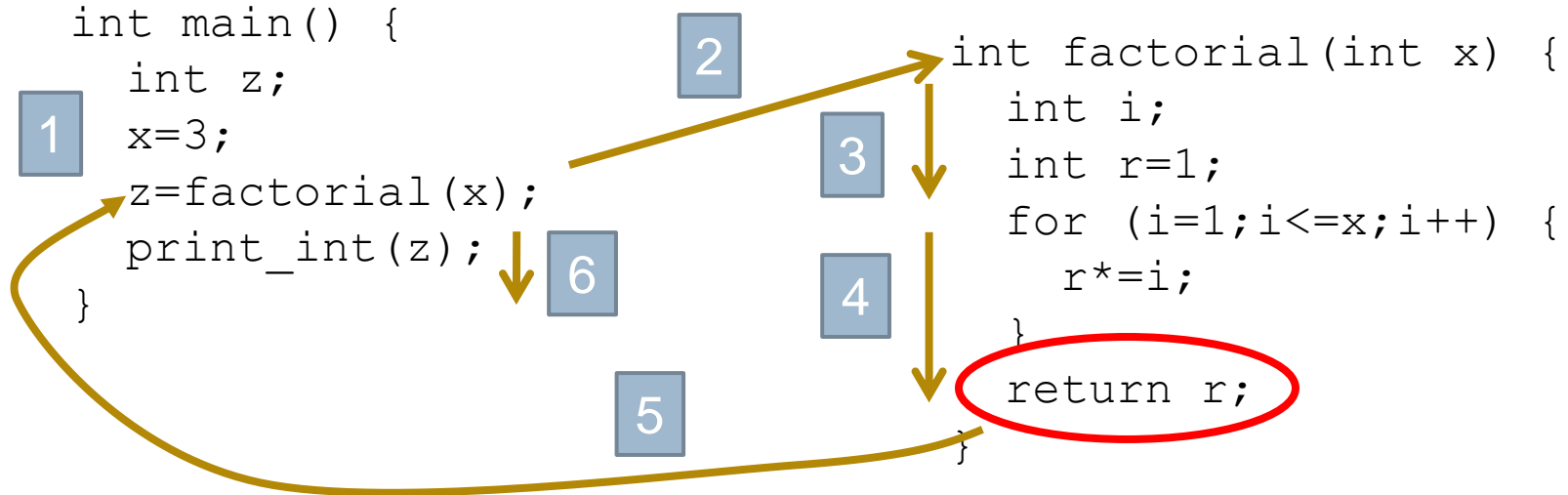


```
int factorial(int x) {  
    int i;  
    int r=1;  
    for (i=1;i<=x;i++) {  
        r*=i;  
    }  
    return r;  
}
```

1. Situar los parámetros en un lugar donde la función pueda accederlos
2. Transferir el control a la función
3. Adquirir los recursos de almacenamiento necesarios para la función
4. Realizar la tarea deseada
5. Guardar el resultado donde la función llamante pueda acceder a él
6. Devolver el control al punto de origen

Pasos en la ejecución de una función de alto nivel

resumen



1. Situar los parámetros en un lugar donde la función pueda accederlos
2. Transferir el control a la función
3. Adquirir los recursos de almacenamiento necesarios para la función
4. Realizar la tarea deseada
5. Guardar el resultado donde la función llamante pueda acceder a él
6. Devolver el control al punto de origen

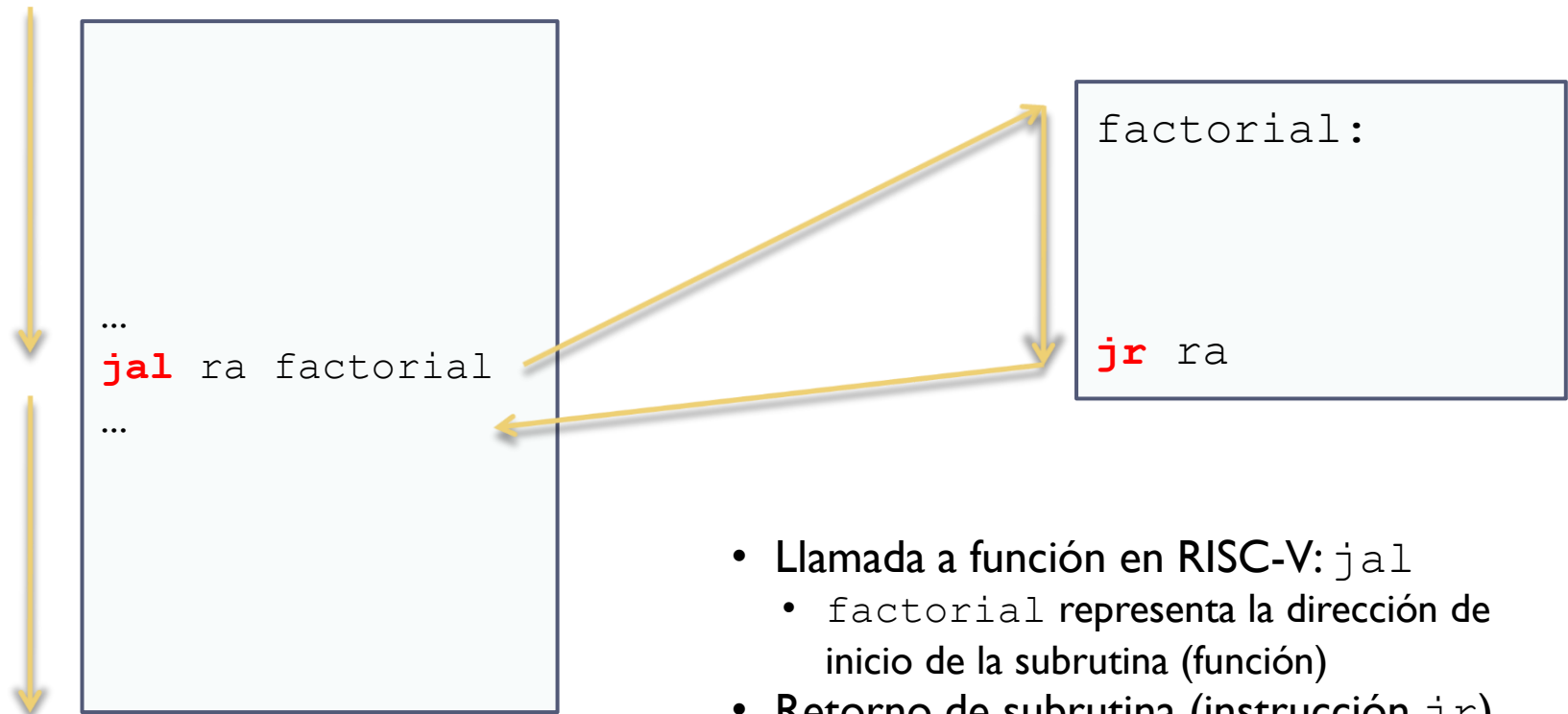
Procedimientos y funciones

```
int factorial(int x) {  
    int i;  
    int r=1;  
    for (i=1;i<=x;i++) {  
        r*=i;  
    }  
    return r;  
}  
...  
r1 = factorial(3) ;  
...
```

```
factorial:  
    mv    t0 a0  
    li    v0 1  
b1: beq   t0 zero f1  
    mul   v0 v0 t0  
    addi  t0 t0 -1  
    j     b1  
f1: jrr   ra  
...  
li    a0 3  
jal   ra factorial  
...
```

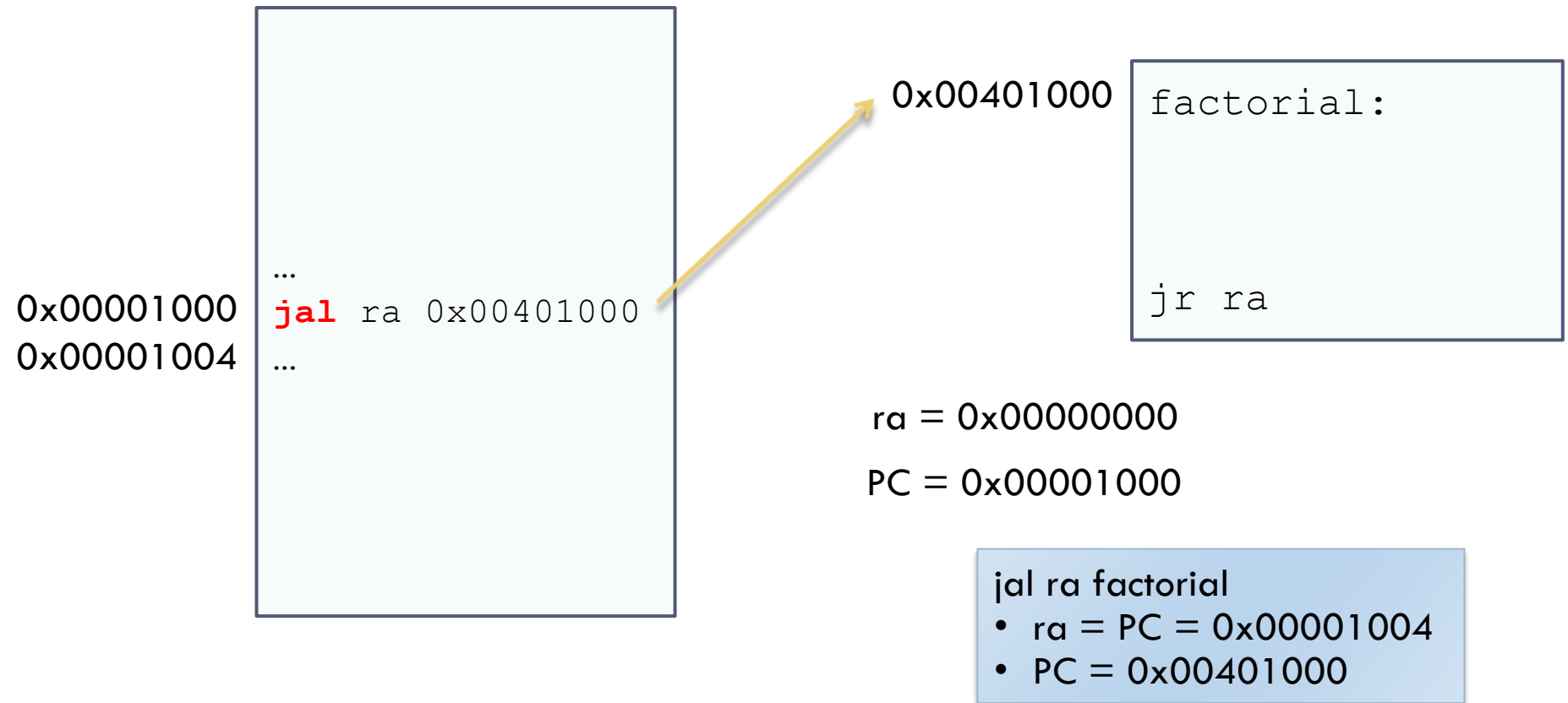
- ▶ Un función (procedimiento, método) en alto nivel es un subprograma que realiza una tarea específica cuando se le invoca
 - ▶ Recibe argumentos o parámetros de entrada
 - ▶ Devuelve algún resultado
- ▶ En ensamblador una función (subrutina) se asocia con una etiqueta en la primera instrucción de la función
 - ▶ Nombre simbólico que denota su dirección de inicio
 - ▶ La dirección de memoria donde se encuentra la primera instrucción

Llamadas a funciones en RISC-V

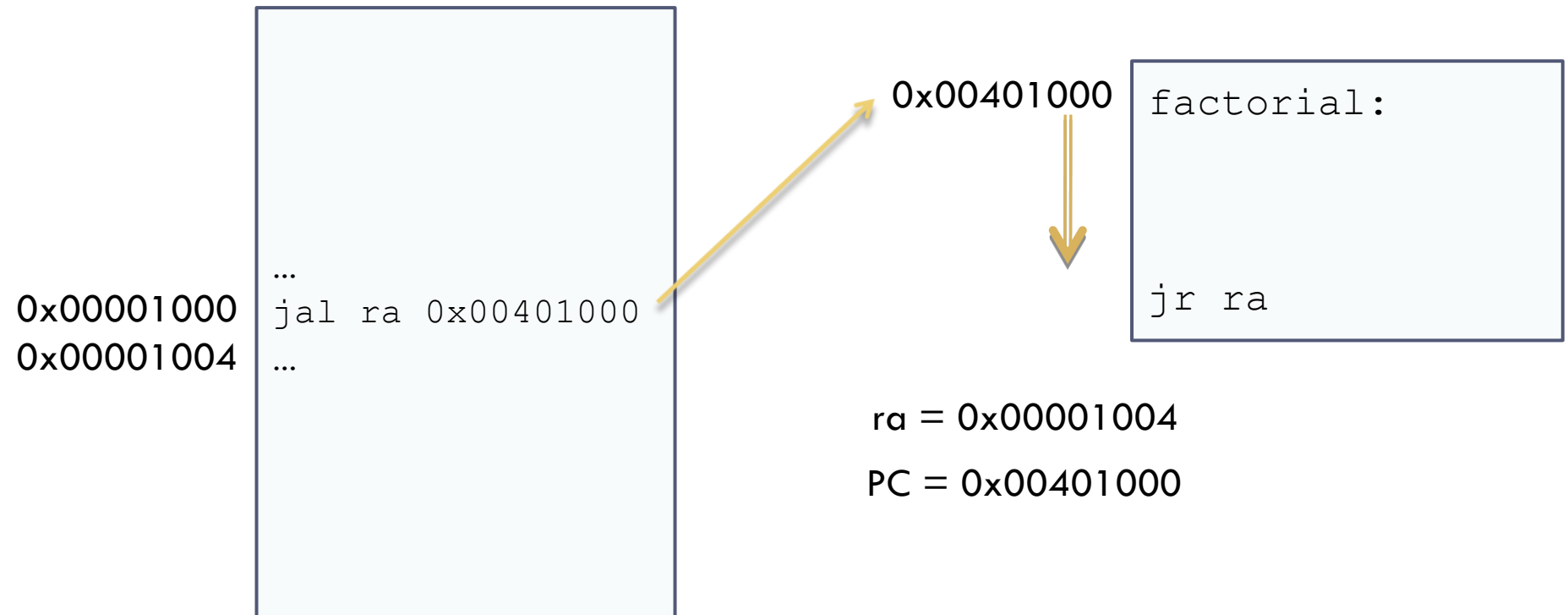


- Llamada a función en RISC-V: `jal`
 - `factorial` representa la dirección de inicio de la subrutina (función)
- Retorno de subrutina (instrucción `jr`)

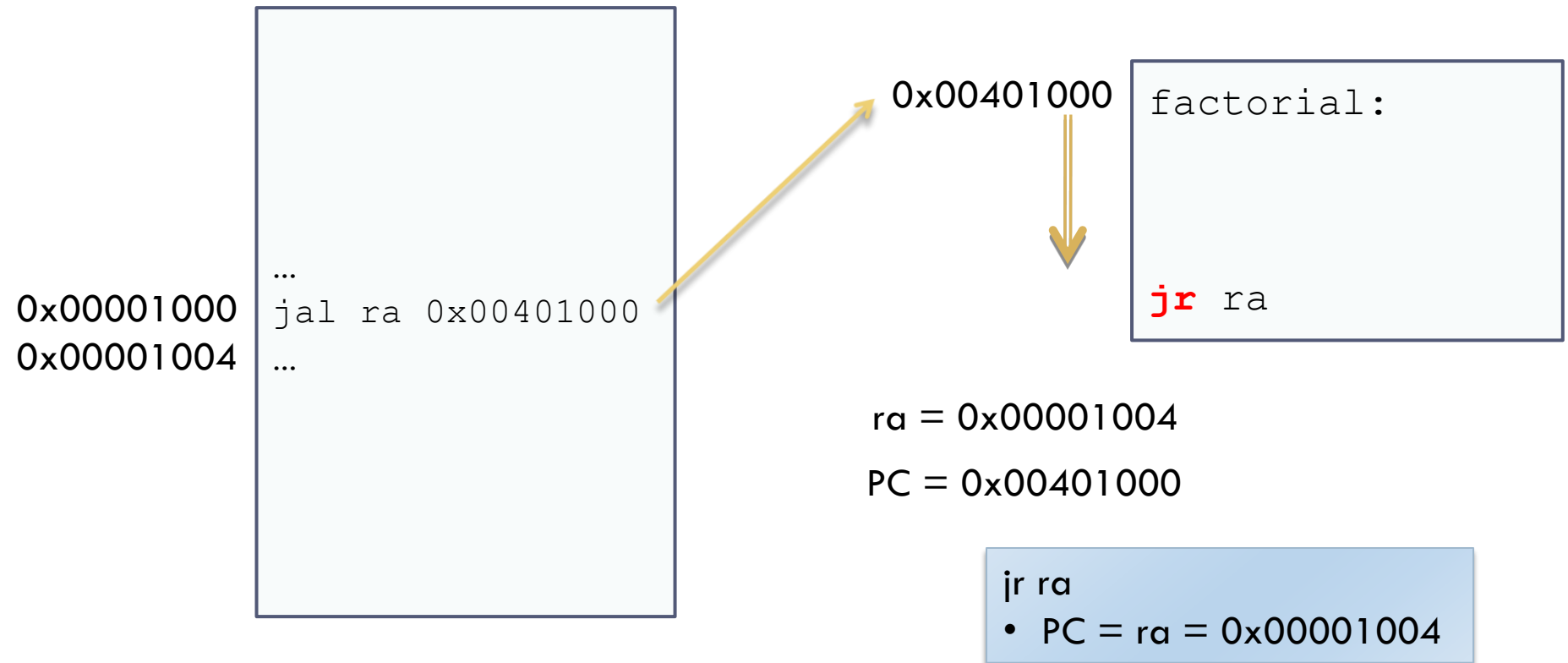
Llamadas a funciones en RISC-V



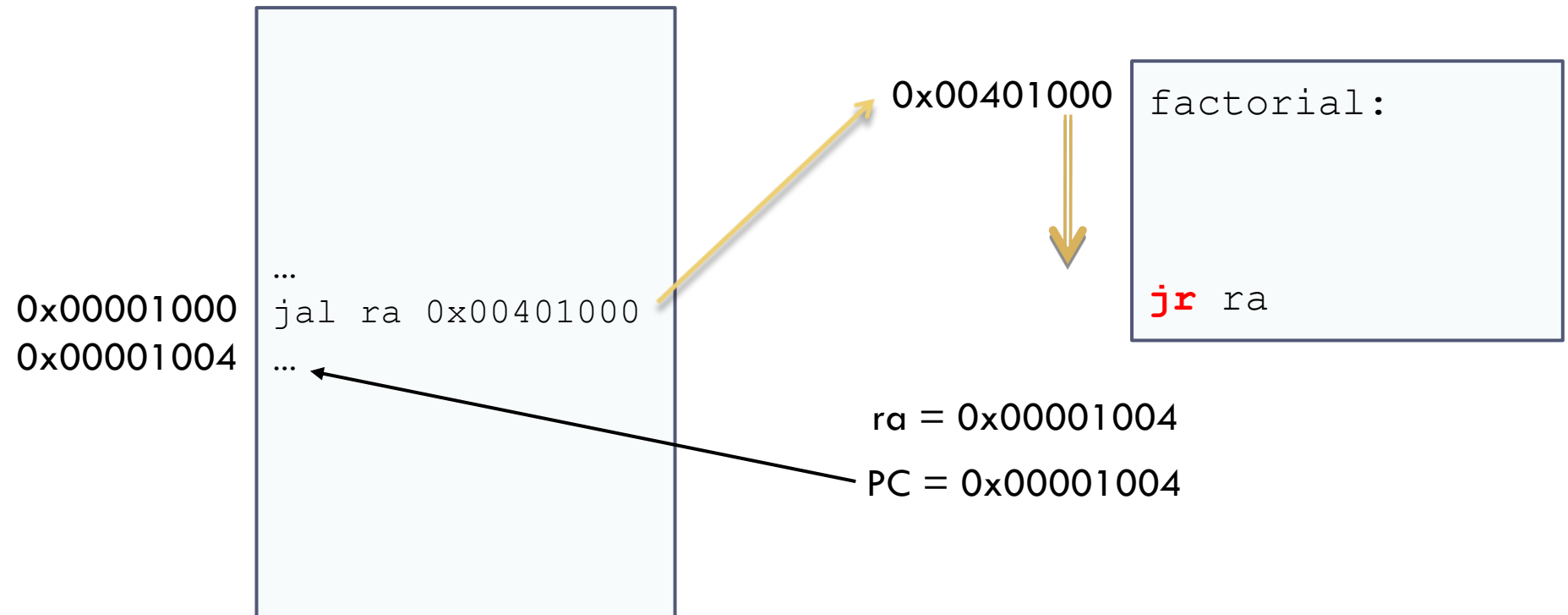
Llamadas a funciones en RISC-V



Llamadas a funciones en RISC-V



Llamadas a funciones en RISC-V

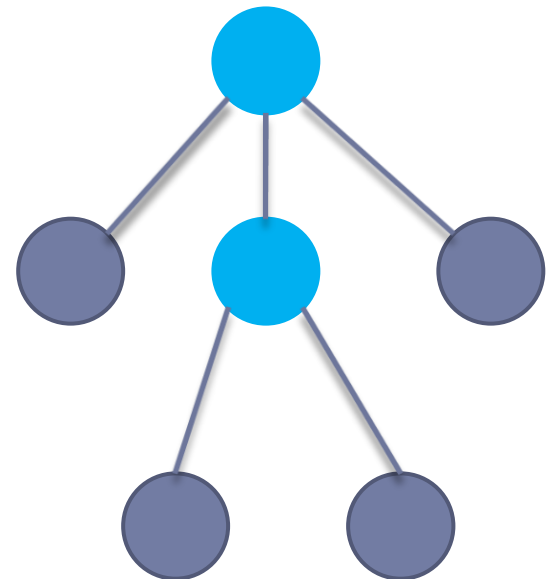


Instrucciones jal/jr

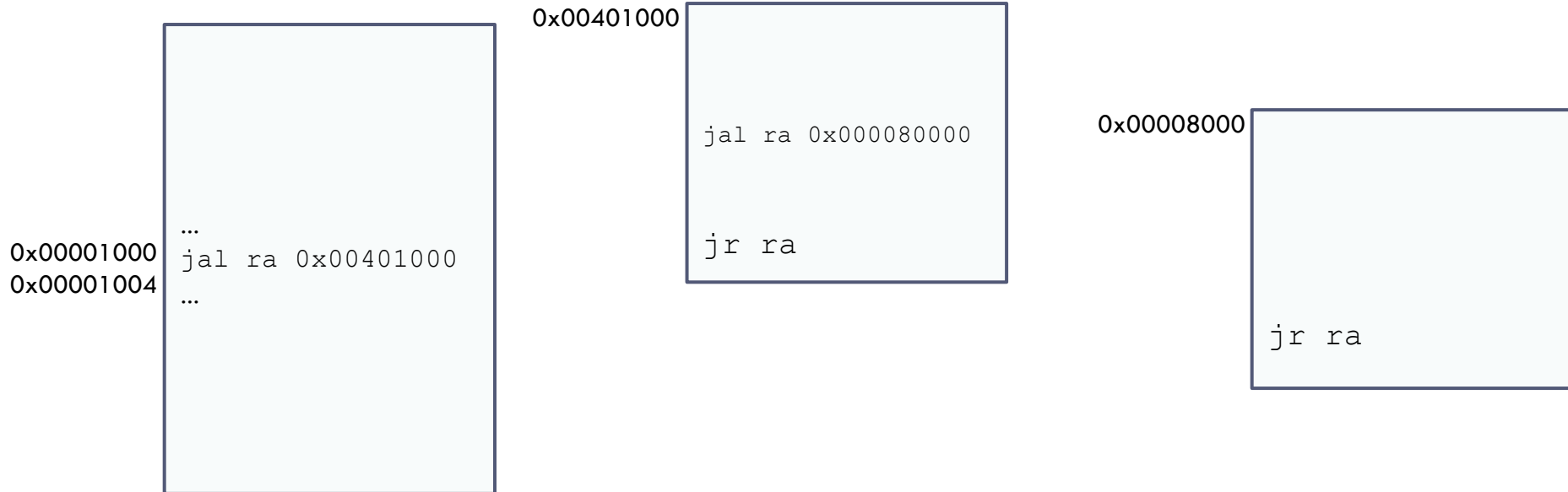
- ▶ ¿Qué hace la instrucción jal?
 - ▶ $ra \leftarrow PC$
 - ▶ $PC \leftarrow \text{Dirección de salto}$
- ▶ ¿Qué hace la instrucción jr?
 - ▶ $PC \leftarrow ra$

Tipos de subrutinas

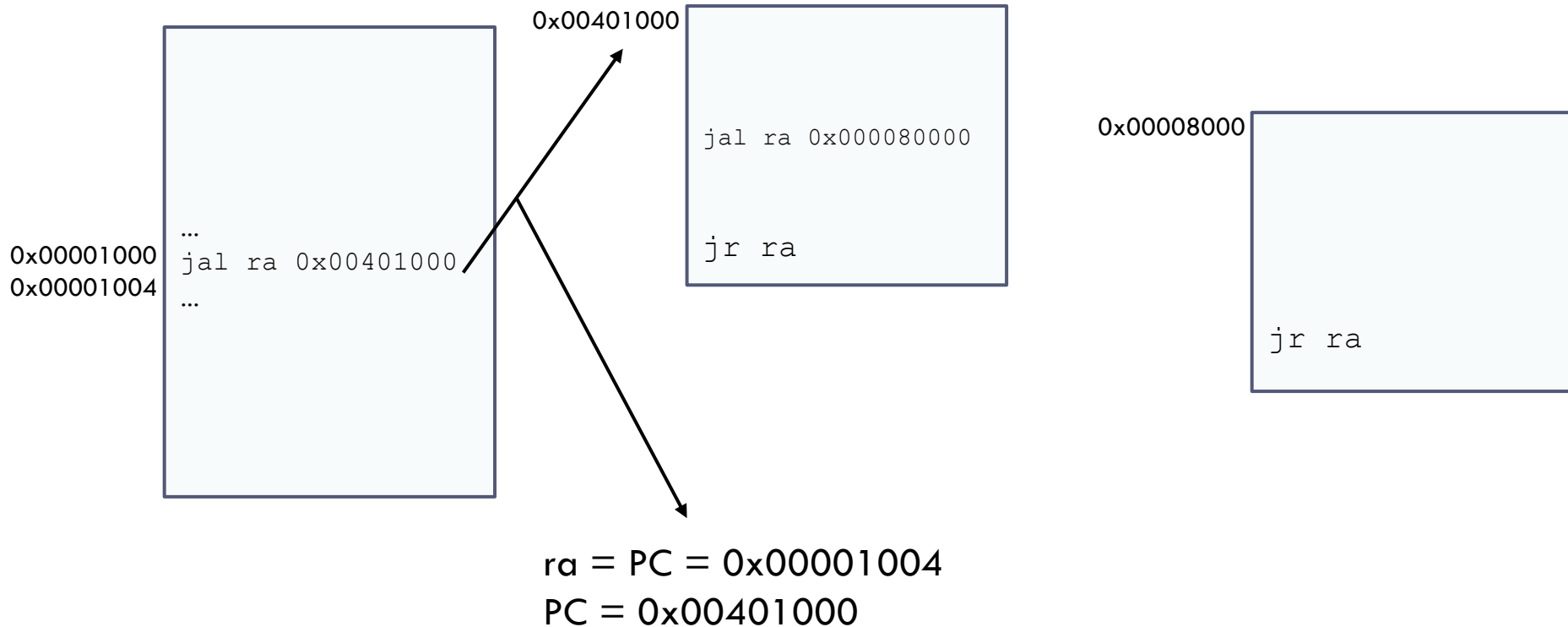
- **Subrutina terminal.**
 - ▶ No invoca a ninguna otra subrutina.
- **Subrutina no terminal.**
 - ▶ Invoca a alguna otra subrutina.



Problema en subrutinas no terminales

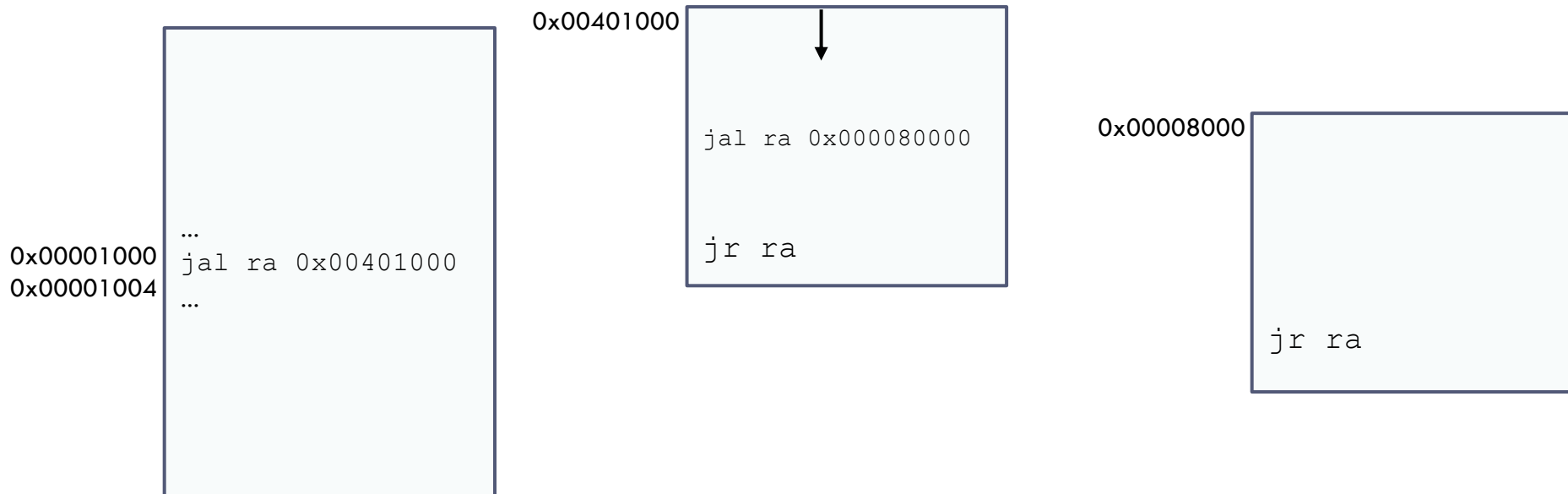


Problema en subrutinas no terminales



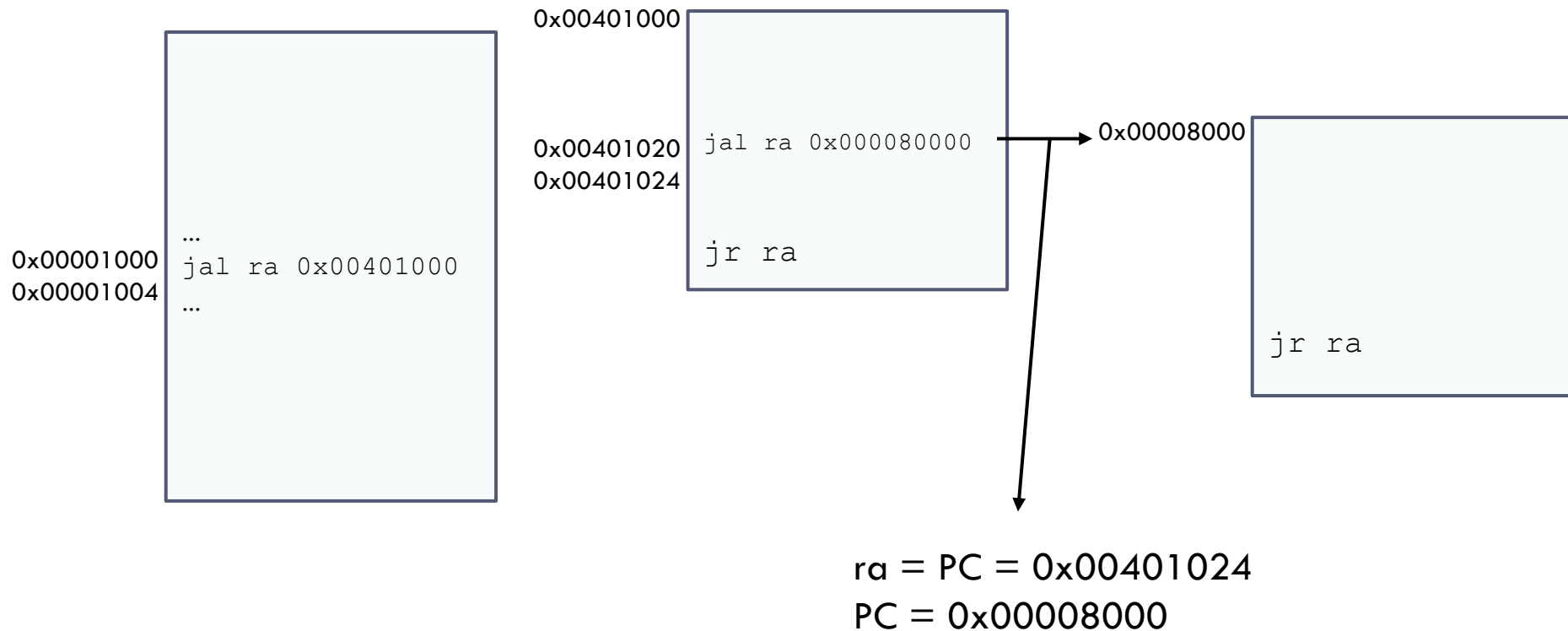
Dirección de retorno ra = PC = 0x00001004

Problema en subrutinas no terminales



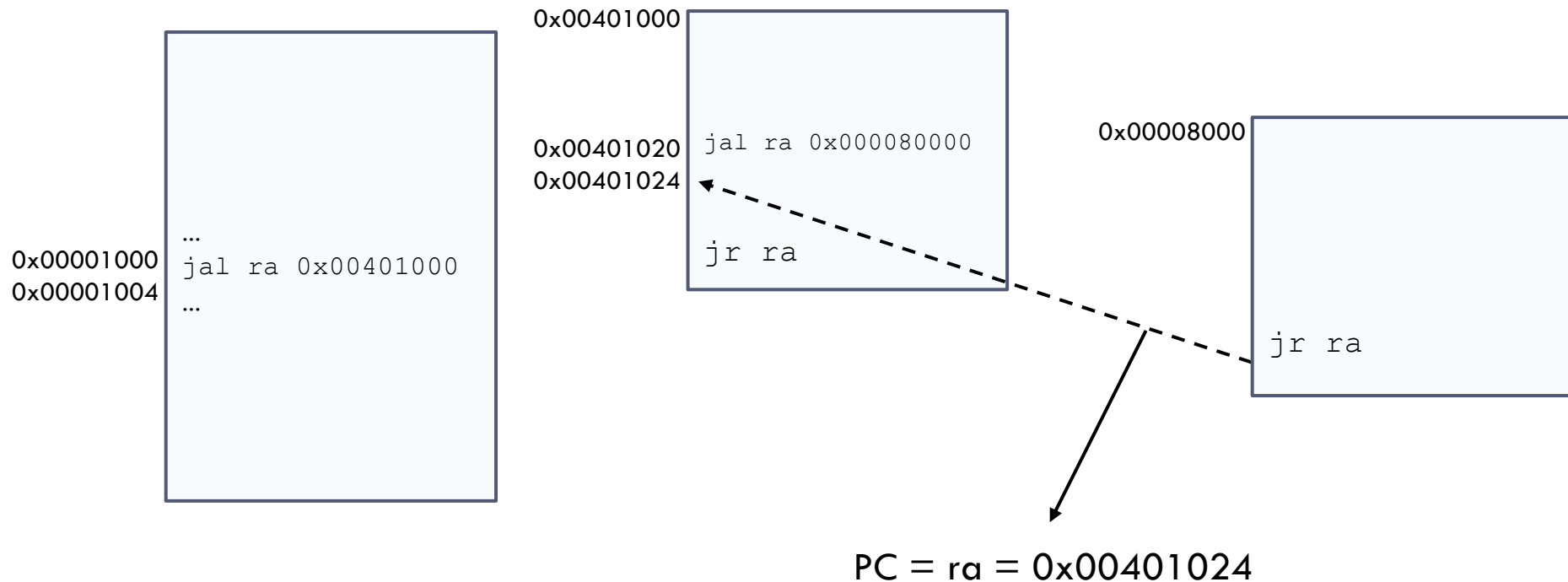
Dirección de retorno $ra = PC = 0x00001004$

Problema en subrutinas no terminales



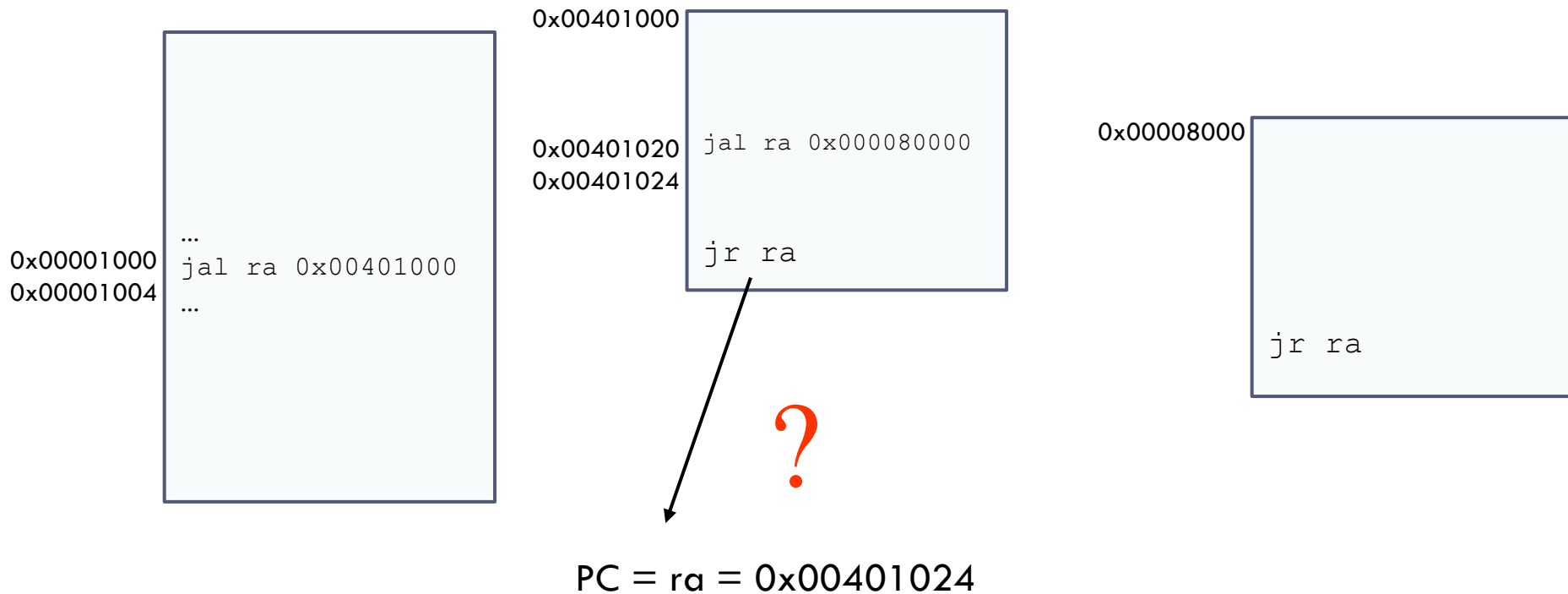
~~Dirección de retorno ra = PC = 0x00001004~~

Problema en subrutinas no terminales



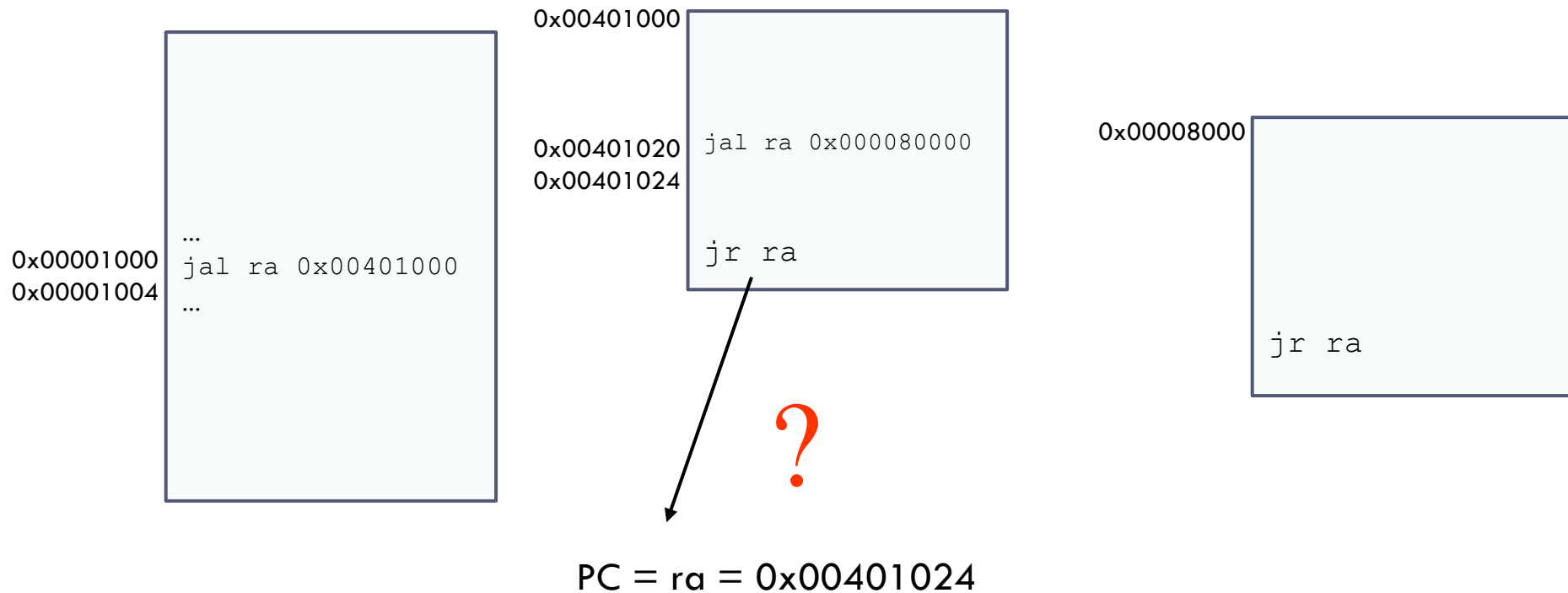
~~Dirección de retorno ra = PC = 0x00001004~~

Problema en subrutinas no terminales



~~Dirección de retorno ra = PC = 0x00001004~~

Problema en subrutinas no terminales

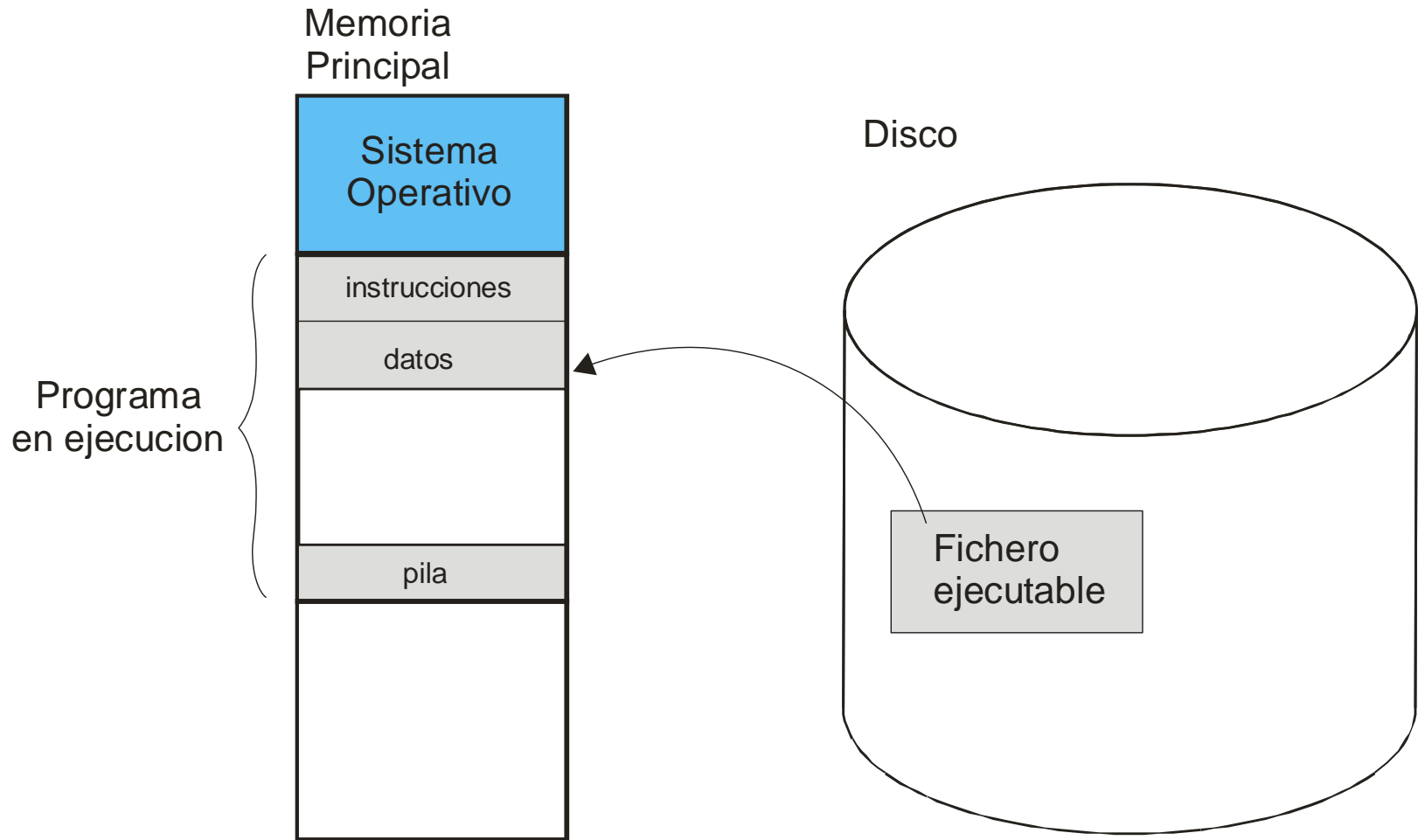


Se ha perdido la dirección de retorno

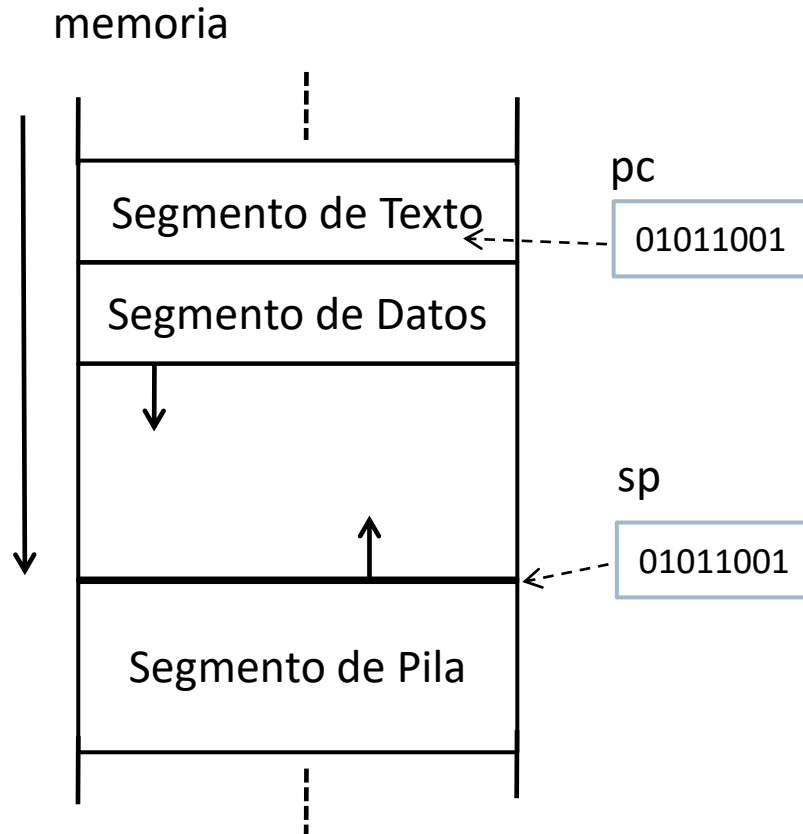
¿Dónde guardar la dirección de retorno?

- ▶ El computador dispone de dos elementos para almacenamiento:
 - ▶ Registros
 - ▶ Memoria
- ▶ Registros: No se pueden utilizar los registros porque su número es limitado
- ▶ Memoria: Se guarda en memoria principal
 - ▶ En una zona del programa que se denomina **pila**

Ejecución de un programa



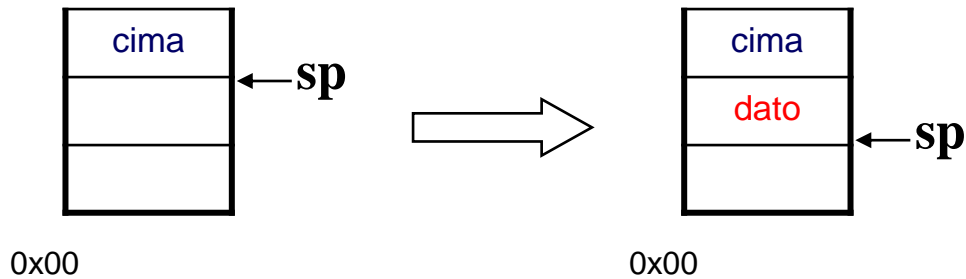
Mapa de memoria de un proceso



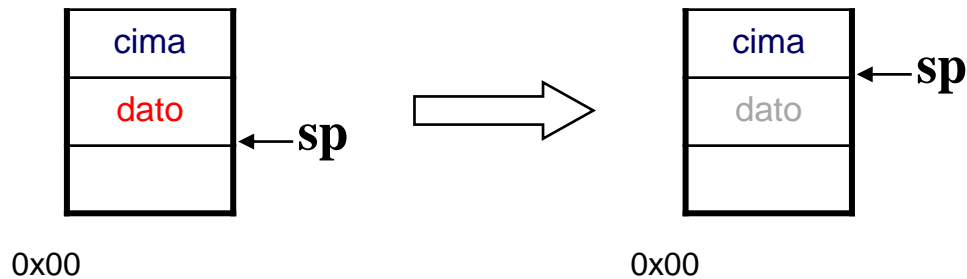
- ▶ El programa de usuario se divide en segmentos:
 - ▶ Segmento de código (texto)
 - ▶ Código, instrucciones máquina
 - ▶ Segmento de datos
 - ▶ Datos estáticos, variables globales
 - ▶ **Segmento de pila**
 - ▶ Variables locales
 - ▶ Contexto de funciones

Pila

PUSH Reg Apila el contenido del registro (dato)



POP Reg Desapila el contenido del registro (dato)
Copia dato en el registro Reg

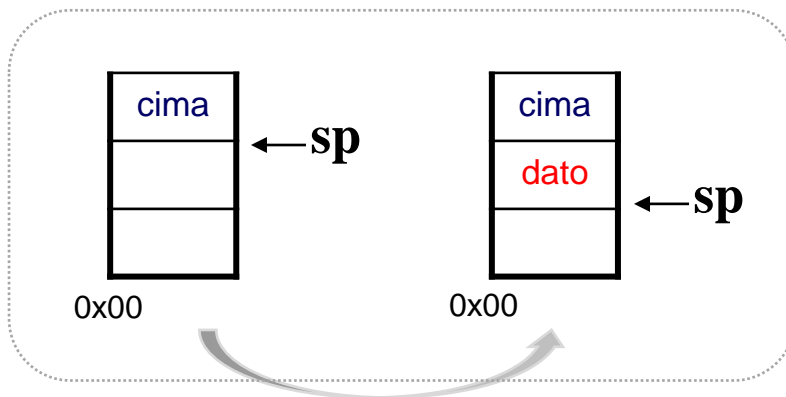


Antes de empezar

- ▶ RISC-V no dispone de instrucciones PUSH o POP.
- ▶ El registro puntero de pila (sp) es visible al programador.
 - ▶ Se va a asumir que el puntero de pila apunta al último elemento de la pila

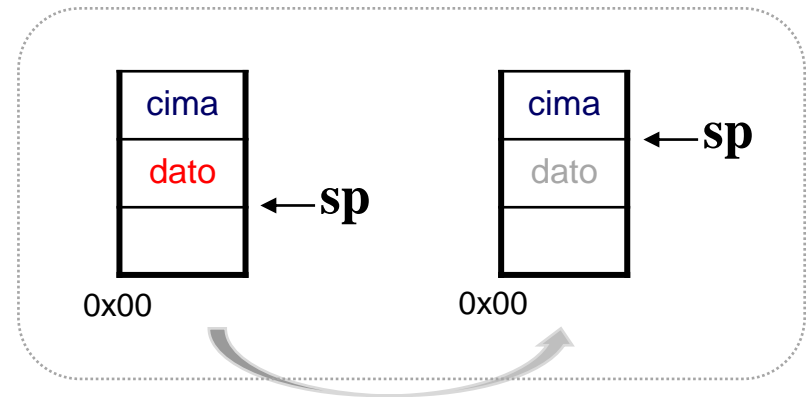
PUSH $t0$

```
addi sp, sp, -4  
sw    t0, 0(sp)
```



POP $t0$

```
lw    t0, 0(sp)  
addi sp, sp, 4
```



Operación PUSH en el RISC-V

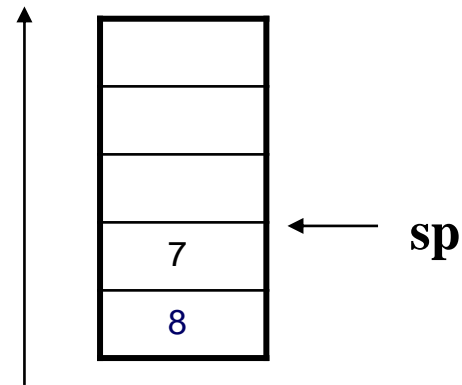
...

```
li    t2, 9
```

```
addi  sp, sp, -4
```

```
sw    t2 0(sp)
```

...

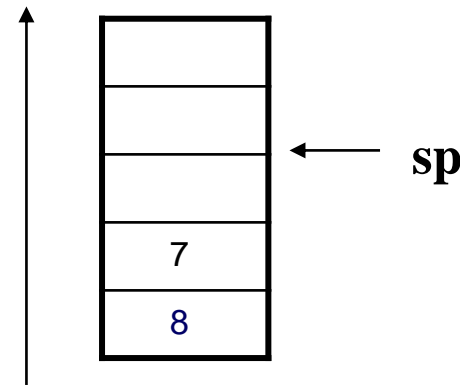


► Estado inicial:

- El registro puntero de pila (sp) apunta al último elemento situado en la cima de la pila
- El registro t2 almacena el valor 9

Operación PUSH en el RISC-V

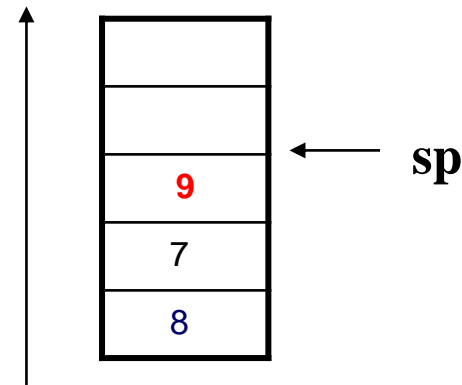
```
...  
li    t2, 9  
addi sp, sp, -4  
sw    t2 0(sp)  
...
```



- ▶ Se resta 4 al registro puntero de pila para poder insertar una nueva palabra en la pila
 - ▶ `addi sp, sp, -4`

Operación PUSH en el RISC-V

```
...  
li    t2, 9  
addi  sp, sp, -4  
sw    t2 0(sp)  
...
```



- ▶ Se inserta el contenido del registro t2 en la cima de la pila:
 - ▶ `sw t2 0(sp)`

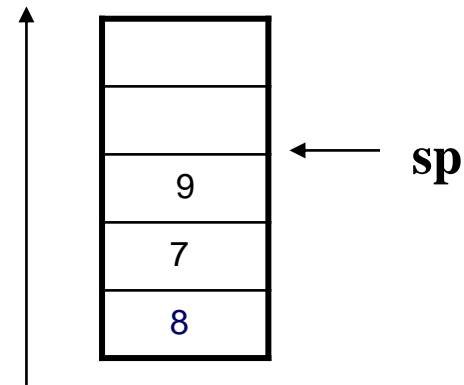
Operación POP en el RISC-V₃₂

...

```
lw    t2 0(sp)
```

```
addi  sp, sp, 4
```

...



- ▶ Se copia en t2 el dato almacenado en la cima de la pila (9)
 - ▶ lw t2 0(sp)

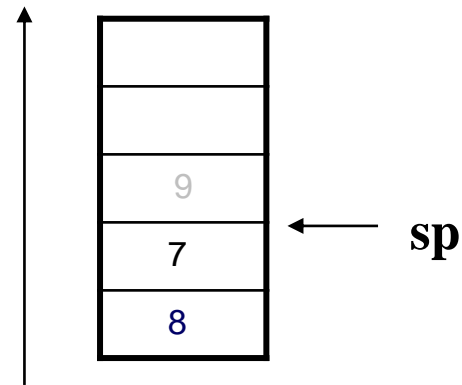
Operación POP en el RISC-V

...

```
lw    t2 0(sp)
```

```
addi sp, sp, 4
```

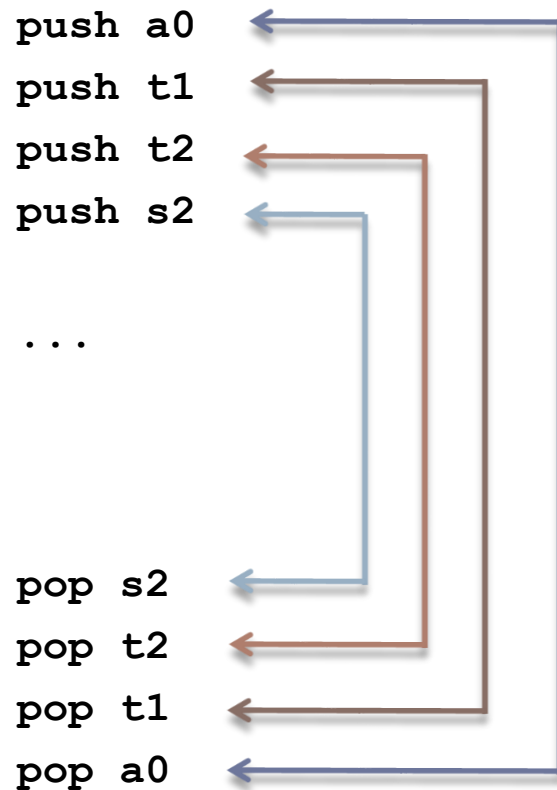
...



- ▶ Se actualiza el registro `sp` para apuntar a la nueva cima de la pila.
 - ▶ `addi sp, sp, 4`
- ▶ El dato desapilado (9) sigue estando en memoria pero será sobrescrito en futuras operaciones PUSH (o similar de acceso a memoria)

Pila

uso de push y pop consecutivos



Pila

uso de push y pop consecutivos

```
push a0
push t1
push t2
push s2
```

...

```
pop s2
pop t2
pop t1
pop a0
```

```
addi sp sp -4
sw a0 0(sp)
addi sp sp -4
sw t1 0(sp)
addi sp sp -4
sw t2 0(sp)
addi sp sp -4
sw s2 0(sp)
```

...

```
lw s2 0(sp)
addi sp sp 4
lw t2 0(sp)
addi sp sp 4
lw t1 0(sp)
addi sp sp 4
lw a0 0(sp)
addi sp sp 4
```

Pila

uso de push y pop consecutivos

```
push a0
push t1
push t2
push s2
```

...

```
pop s2
pop t2
pop t1
pop a0
```

```
addi sp sp -16
sw   a0 12(sp)
sw   t1 8(sp)
sw   t2 4(sp)
sw   s2 0(sp)
```

...

```
lw   s2 0(sp)
lw   t2 4(sp)
lw   t1 8(sp)
lw   a0 12(sp)
addi sp sp 16
```

Pila, jal y jr...

no_terminal:

```
addi sp, sp, -4  
sw    ra, 0(sp)
```



Se guarda ra en la pila al principio

```
li    t0, 8  
li    s0, 9
```

...

```
jal   ra, función
```

...

```
lw    ra, 0(sp)  
addi sp, sp, 4  
jr    ra
```



Se recupera el valor antes de “jr ra”

Convenio de parámetros y registros

```
no_terminal:
```

```
    addi sp, sp, -4  
    sw   ra, 0(sp)
```

```
    li   t0, 8  
    li   s0, 9
```

```
    ...
```



¿En qué registros se pasa los parámetros y devuelve los resultados?

```
    jal ra, función
```

```
    ...
```



¿Qué valores tienen los registros t0 y s0 a la vuelta?

```
    lw   ra, 0(sp)  
    addi sp, sp, 4  
    jr   ra
```

Convenio de paso de parámetros

- ▶ Cuando se programa en ensamblador se define un convenio que especifica cómo se pasan los argumentos y cómo se tratan los registros
- ▶ Los compiladores definen este convenio para una determinada arquitectura
- ▶ En la asignatura se va a utilizar una versión simplificada de los convenios que utilizan los compiladores

Convenio simplificado de paso de parámetros

- ▶ Los parámetros **enteros** (char, int) se pasan en **a0 ... a7**
 - ▶ Si se necesita pasar más de ocho parámetros, los ocho primeros en los registros a0 ... a7 y el resto en la pila
- ▶ Los parámetros **float** se pasan en **fa0 ... fa7**
 - ▶ Si se necesita pasar más de ocho parámetros, el resto en la pila
- ▶ Los parámetros **double** se pasan en **fa0 ... fa7**
 - ▶ Si se necesita pasar más de cuatro parámetros, el resto en la pila

Retorno de resultados en RISC-V

- ▶ Se usa **a0** y **a1** para valores de tipo entero
- ▶ Se usa **fa0** y **fa1** para valores de tipo float y double
- ▶ En caso de estructuras o valores complejos han de dejarse en pila. El espacio lo reserva la función que realiza la llamada

Convenio de parámetros y registros

```
no_terminal:
```

```
    addi sp, sp, -4  
    sw   ra, 0(sp)
```

```
    li   t0, 8  
    li   s0, 9
```

```
    ... ←
```

¿En qué registros se pasa los parámetros y devuelve los resultados?

```
    jal  ra, función
```

```
    ... ←
```

¿Qué valores tienen los registros t0 y s0 a la vuelta?

```
    lw   ra, 0(sp)  
    addi sp, sp, 4  
    jr   ra
```

Convención en el uso de los registros (RISC-V)

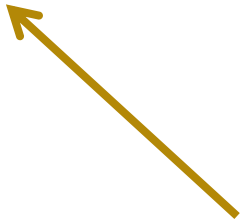
Nombre	Uso	Preservar el valor
zero	Constante 0	No
ra	Dirección de retorno (rutinas)	Si
sp	Puntero a pila	Si
gp	Puntero al área global	No
tp	Puntero al hilo	No
t0 ... t6	Temporal	No
s0/fp	Temporal / Puntero a marco de pila	Si
s1 ... s11	Temporal	Si
a0 ... a7	Argumento de entrada para rutinas	No

Nombre	Uso	Preservar el valor
ft0 ... ft11	Temporales	No
fs0 ... fs11	Temporales a guardar	Si
fa0 ... fa1	Argumentos/retorno	No
fa2 ... fa7	Argumentos	No

Convenio de registros

```
li    t0, 8
li    s0, 9

li    a0, 7    # parámetro
jal   ra, funcion
```



De acuerdo al convenio, s0 seguirá valiendo 9, pero no hay garantía de que t0 valga 8 ni que a0 valga 7.

Si queremos que t0 siga valiendo 8 habrá que guardarse en la pila antes de llamar a la función.

Convenio de registros

```
li    t0, 8  
li    s0, 9
```

```
addi  sp, sp, -4  
sw    t0, 0(sp)
```

← Se guarda en la pila antes de la llamada

```
li    a0, 7    # parámetro  
jal   ra, función
```


```
lw    t0, 0(sp)  
addi  sp, sp, 4
```

← Se recupera el valor después

Ejemplo

(1) Se parte de un código en lenguaje de alto nivel

```
int main() {  
    int z;  
    z=factorial(5);  
    print_int(z);  
    .  
    .  
    .  
}  
  
int factorial(int x) {  
    int i;  
    int r=1;  
    for (i=1;i<=x;i++) {  
        r*=i;  
    }  
    return r;  
}
```



Ejemplo

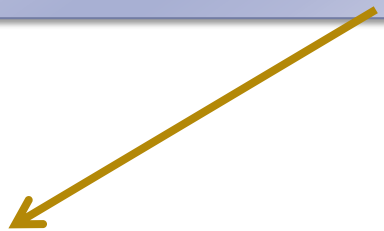
(2) Pensar en el paso de parámetros

- ▶ Los **parámetros** en RISC-V se pasarán en a0 ... a7
- ▶ Los **resultados** en RISC-V se recogen en a0, a1
 - ▶ Más adelante se verá con más detalle
- ▶ Si se necesita pasar más de ocho parámetros, los ocho primeros en los registros a0...a7 y el resto en la pila
- ▶ En la llamada `z=factorial(5);`
 - ▶ Un parámetro de entrada: en a0
 - ▶ Un resultado en a0

Ejemplo

(3) Se pasa a ensamblador cada función

El parámetro se pasa en a0
El resultado se devuelve en a0



```
int main() {  
    int z;  
    z=factorial(5);  
    print_int(z);  
    . . .  
}  
  
int factorial(int x) {  
    int i;  
    int r=1;  
    for (i=1;i<=x;i++) {  
        r*=i;  
    }  
    return r;  
}
```

→ main:

```
# factorial(5)  
li  a0, 5      # arg.  
jal ra factorial # invoke  
mv  a0 v0      # result  
# print_int(z)  
li  a7, 1  
ecall  
...  
  
factorial: li  s1, 1    #s1 for r  
           li  s0, 1    #s0 for i  
loop:     bgt  s0, a0, end  
           mul  s1, s1, s0  
           addi s0, s0, 1  
           j    loop  
end:      mv   a0, s1   #result  
           jr   ra
```

Ejemplo

(4) Se analizan los registros que se modifican

```
int factorial(int x) {  
    int i;  
    int r=1;  
    for (i=1; i<=x; i++) {  
        r*=i;  
    }  
    return r;  
}
```



```
factorial: li    s1, 1    #s1 for r  
           li    s0, 1    #s0 for i  
loop:      bgt   s0, a0, end  
           mul   s1, s1, s0  
           addi  s0, s0, 1  
           j     loop  
end:       mv    a0, s1    #result  
           jr    ra
```

- La función factorial trabaja (modifica) con los registros s0, s1
- Si estos registros se modifican dentro de la función, podría afectar a la función que realizó la llamada (la función main)
- Por tanto, la función factorial debe guardar el valor de estos registros en la pila al principio y restaurarlos al final

Ejemplo

(5) Se guardan los registros en la pila

```
int factorial(int x) {  
    int i;  
    int r=1;  
    for (i=1;i<=x;i++) {  
        r*=i;  
    }  
    return r;  
}
```



```
factorial: addi    sp, sp, -8  
           sw     s0, 4(sp)  
           sw     s1, 0(sp)  
           li     s1, 1    # s1 para r  
           li     s0, 1    # s0 para i  
bucle:    bgt     s0, a0, fin  
           mul     s1, s1, s0  
           addi    s0, s0, 1  
           j       bucle  
fin:      mv      a0, s1    # resultado  
           lw      s1, 0(sp)  
           lw      s0, 4(sp)  
           addi    sp, sp, 8  
           jr      ra
```

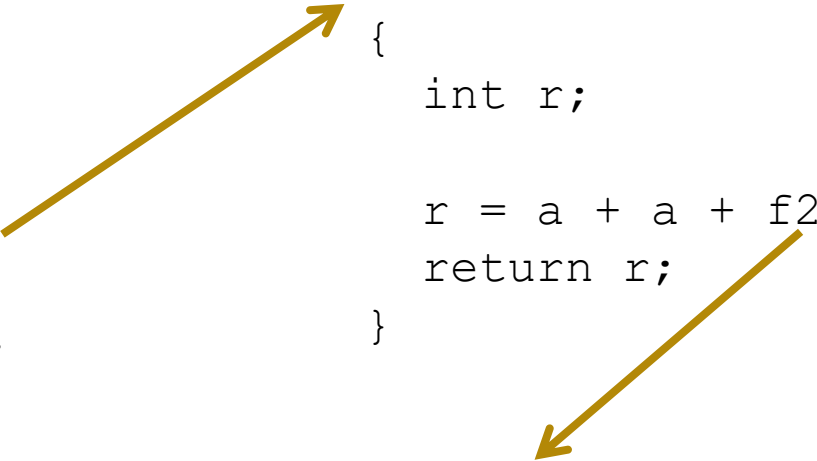
No es necesario guardar ra. La rutina factorial es terminal

Se guarda en la pila s0 y s1 porque se modifican

Si se hubiera utilizado t0 y t1 no habría hecho falta hacerlo (los registros t_x no se preservan)

Ejemplo 2

```
int main()  
{  
    int z;  
  
    z=f1(5, 2);  
  
    print_int(z);  
}  
  
int f1 (int a, int b)  
{  
    int r;  
  
    r = a + a + f2(b);  
    return r;  
}  
  
int f2(int c)  
{  
    int s;  
  
    s = c * c * c;  
    return s;  
}
```




Ejemplo 2. Invocación

```
int main()
{
    int z;

    z=f1(5, 2);

    print_int(z);
}
```




li	a0,	5	# primer argumento
li	a1,	2	# segundo argumento
jal	ra,	f1	# llamada
			# resultado (a0)
li	a7,	1	
ecall			# llamada para
			# imprimir un int

Los parámetros se pasan en a0 y a1
El resultado se devuelve en a0

Ejemplo 2. Cuerpo de f1

```
int f1 (int a, int b)
{
    int r;

    r = a + a + f2(b);
    return r;
}
```



```
f1: add    s0, a0, a0

      mv    a0, a1
      jal   ra f2
      add   a0, s0, a0

      jr    ra
```

```
int f2(int c)
{
    int s;

    s = c * c * c;
    return s;
}
```


Ejemplo 2. Se analizan los registros que se modifican en f1

```
int f1 (int a, int b)
{
    int r;

    r = a + a + f2(b);
    return r;
}
```



```
f1: add    s0, a0, a0

     mv     a0, a1
     jal    ra f2
     add    a0, s0, a0

     jr     ra
```

```
int f2(int c)
{
    int s;


    s = c * c * c;
    return s;
}
```

- * f1 modifica s0 y ra, por lo tanto se guardan en la pila
- * El registro ra se modifica en la instrucción jal ra f2
- * El registro a0 se modifica al pasar el argumento a f2, pero por convenio la función f1 no tiene porque guardarlo en la pila solo si lo utiliza después de realizar la llamada a f2

Ejemplo 2. Cuerpo de f1 guardando en la pila los registros que se modifican

```
int f1 (int a, int b)
{
    int r;

    r = a + a + f2(b);
    return r;
}
```



```
int f2(int c)
{
    int s;

    s = c * c * c;
    return s;
}
```

```
f1: addi    sp, sp, -8
     sw     s0, 4(sp)
     sw     ra, 0(sp)
```

```
     add    s0, a0, a0
     mv     a0, a1
     jal    ra f2
     add    a0, s0, a0
```

```
     lw     ra, 0(sp)
     lw     s0, 4(sp)
     addu    sp, sp, 8
```

```
     jr     ra
```


Ejemplo 2. Cuerpo de f2

```
int f1 (int a, int b)
{
    int r;

    r = a + a + f2(b);
    return r;
}
```

```
int f2(int c)
{
    int s;

    s = c * c * c;
    return s;
}
```



```
f2: mul t0, a0, a0
     mul a0, t0, a0
     jr  ra
```

- * La función f2 no modifica el registro ra porque no llama ninguna otra función.
- * El registro t0 no es necesario guardarlo porque no se ha de preservar su valor según convenio

Activación de procedimientos

Marco de pila

- ▶ El **marco de pila o registro de activación** es el mecanismo que utiliza el compilador para activar los procedimientos (subrutinas) en los lenguajes de alto nivel
- ▶ El marco de pila lo construyen en la pila el procedimiento llamante y el llamado

Marco de pila

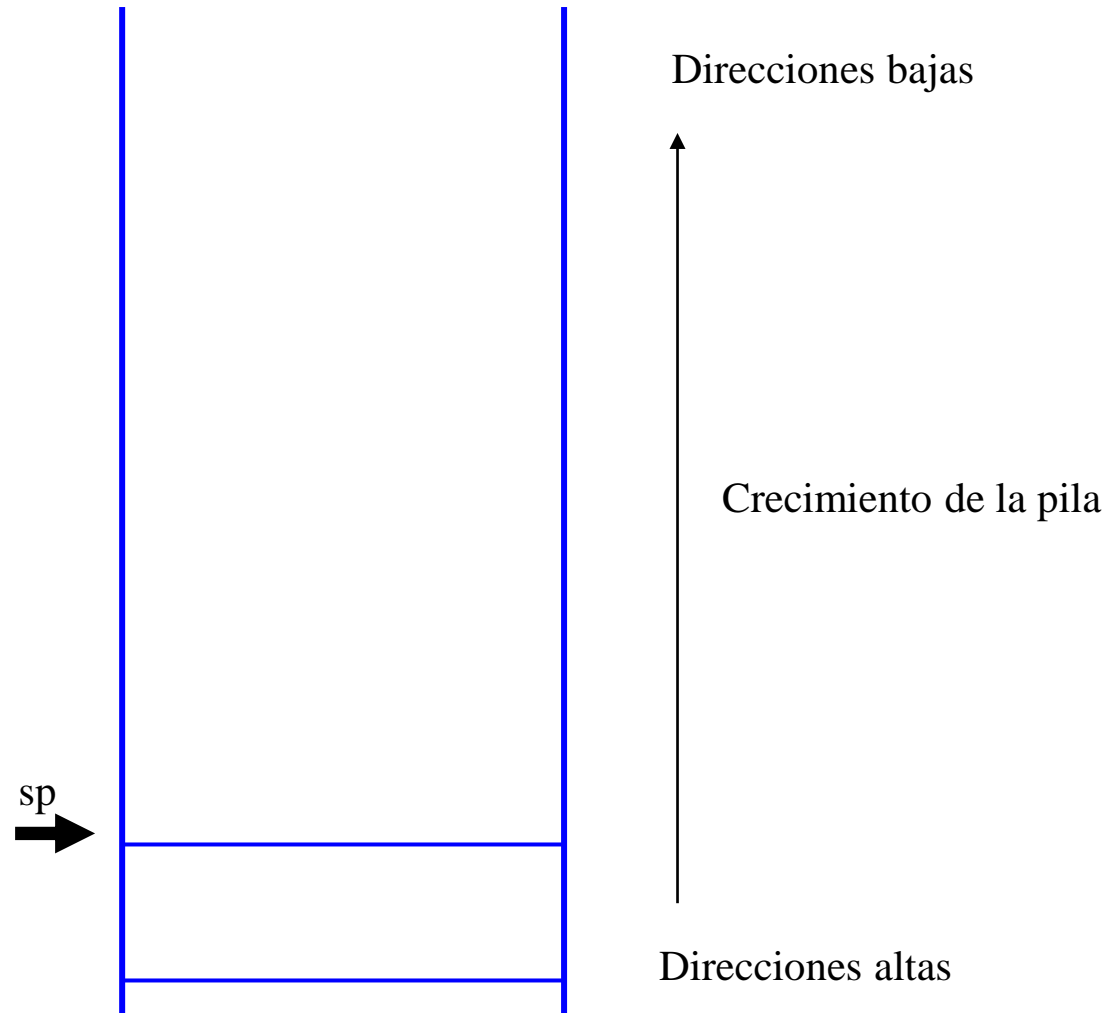
- ▶ El marco de pila almacena:
 - ▶ Los parámetros introducidos por el procedimiento llamante en caso de ser necesarios
 - ▶ Los registros guardados por la función (incluyen al registro `ra` en caso de procedimientos no terminales)
 - ▶ Variables locales

Procedimiento general de llamadas a funciones (versión simplificada)

Subrutina llamante	Subrutina llamada
Salvaguarda de registros que no quiera que modifique la subrutina llamada (t_x, a_x, \dots)	
Paso de parámetros, reserva de espacio para valores a devolver si es necesario	
Llamada a subrutina (jal)	
	Reserva del marco de pila
	Salvaguarda de registros (ra, s_x)
	Ejecución de subrutina
	Restauración de valores guardados
	Copiar valores a devolver en el espacio reservado por el llamante
	Liberación de marco de pila
	Salida de subrutina (jr ra)
Recuperar valores devueltos	
Restauración de registros guardados, liberación del espacio de pila reservado	

Construcción del marco de pila subrutina llamante

No se va a seguir el estrictamente el convenio del RISC-V por simplicidad



Construcción del marco de pila subrutina llamante

Situación **inicial** antes de realizar la **llamada** a un procedimiento

Marco de pila del procedimiento que realiza la llamada

sp
→

(-)

(+)

Construcción del marco de pila subrutina llamante

Salvaguardar Registros

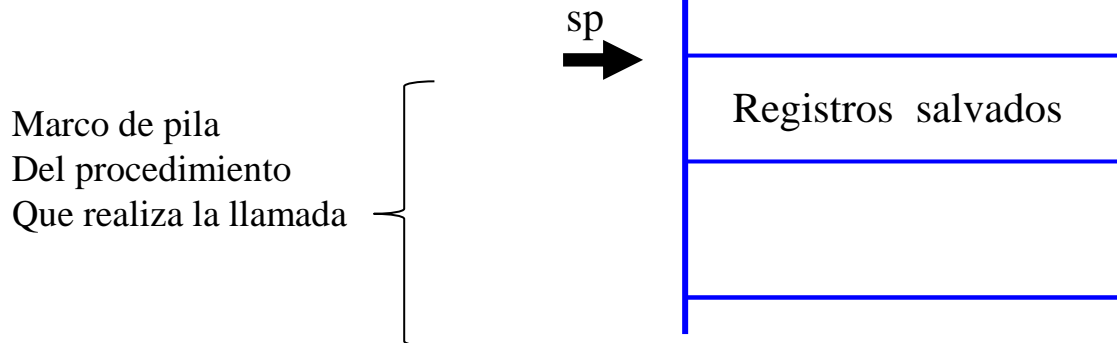
Una subrutina puede modificar cualquier registro **a** y **t**

Ejemplo:

```
li    t0, 4
li    t1, 8
li    a0, 5
jal   ra, funcion
```

```
mv    s2, t0
```

¿Qué valor tiene t0 y t1?



Construcción del marco de pila subrutina llamante

Salvaguardar Registros

Una subrutina puede modificar cualquier registro **a0** y **t0**

Para preservar su valor, la subrutina que realiza la llamada debe guardar en la pila los valores de esos registros

Marco de pila
Del procedimiento
Que realiza la llamada

sp
→

Registros salvados

Ejemplo:

```
li    t0, 4
li    t1, 8
li    a0, 5
jal   ra, funcion
```

```
mv    s2, t0
```

¿Qué valor tiene t0 y t1?

Construcción del marco de pila subrutina llamante

Salvaguardar Registros

Una subrutina puede modificar cualquier registro **a0** y **t0**

Para preservar su valor, la subrutina que realiza la llamada debe guardar en la pila los valores de esos registros

Marco de pila
Del procedimiento
Que realiza la llamada

sp
→

Registros salvados

Ejemplo:

```
subu sp sp 8  
sw  t0 0(sp)  
sw  t1 4(sp)  
  
li   a0, 5  
jal  ra, funcion
```

Construcción del marco de pila subrutina llamante

Salvaguardar Registros

Una subrutina puede modificar cualquier registro **a0** y **t0**

Para preservar su valor, la subrutina que realiza la llamada debe guardar en la pila los valores de esos registros
(habrá que restaurarlos después)

Marco de pila
Del procedimiento
Que realiza la llamada

sp
→

Registros salvados

Ejemplo:

```
sub  sp sp 8
sw   t0 0(sp)
sw   t1 4(sp)

li   a0, 5
jal  ra, funcion

lw   t0 0(sp)
lw   t1 4(sp)
add  sp sp 8
```

Construcción del marco de pila subrutina llamante

Ejemplo (10 parámetros):

Paso de parámetros:

Antes de realizar la llamada el
procedimiento llamante:

Deja los parámetros en $\mathbf{a_x}$ ($\mathbf{f_x}$)

El resto de parámetros en la pila

li a0, 1

li a1, 2

li a3, 3

li a4, 4

li a5, 1

li a6, 2

li a7, 3

addi sp, sp, -8

li t0, 5

sw t0, 4(sp)

li t0, 6

sw t0, 0(sp)

sp
→

primero

Parámetros

último

Registros salvados

Marco de pila

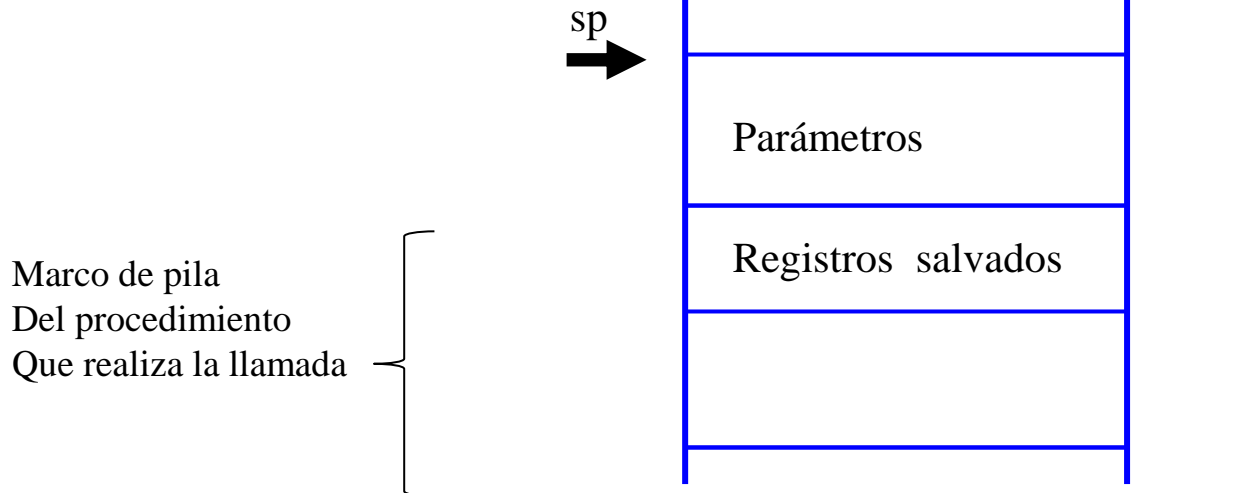
Del procedimiento

Que realiza la llamada

Construcción del marco de pila subrutina llamante

Llamada a subrutina:

llamada a subrutina



Construcción del marco de pila subrutina llamada

Reserva del marco de pila:

$sp = sp - \text{tamaño marco}$

Espacio para:

ra,
s0...s7
variables locales

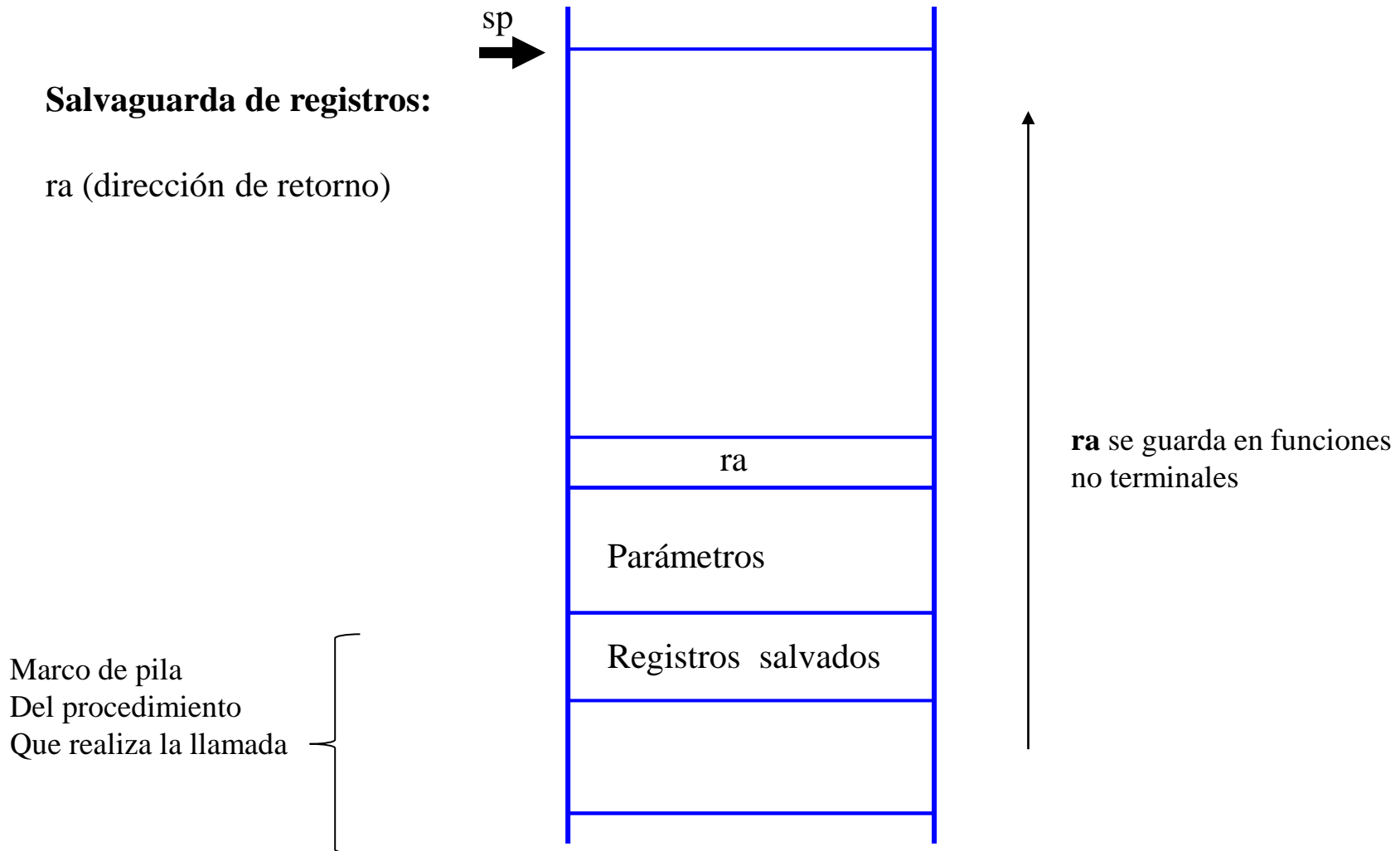
sp
→

Parámetros

Registros salvados

Marco de pila
Del procedimiento
Que realiza la llamada

Construcción del marco de pila subrutina llamada



Construcción del marco de pila subrutina llamada

Salvaguarda de registros s_x :

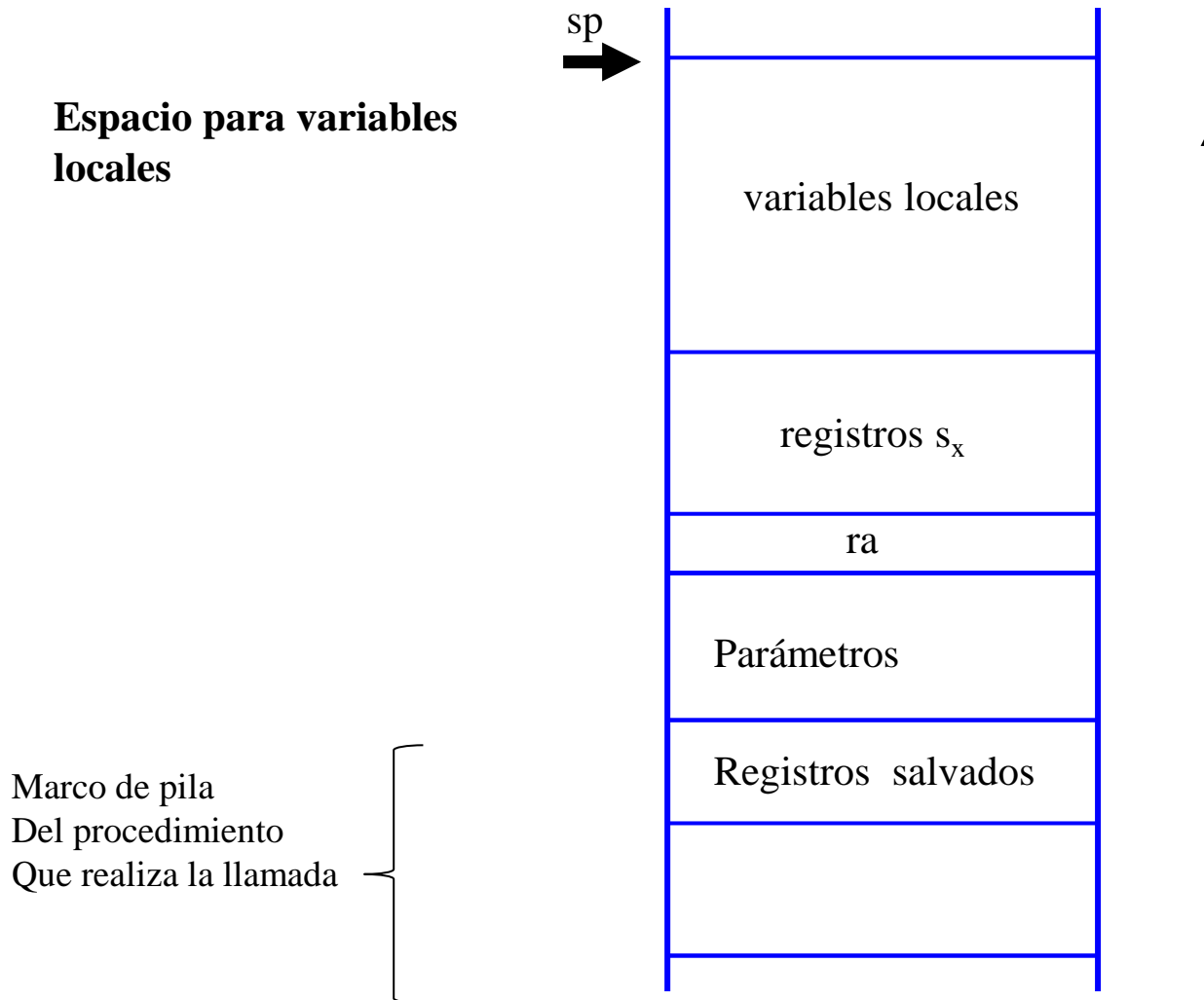
Se guarda los registros s_x que se vayan a modificar

Una función no puede por convenio modificar los registros s_x (sí lo t_x y los a_x)

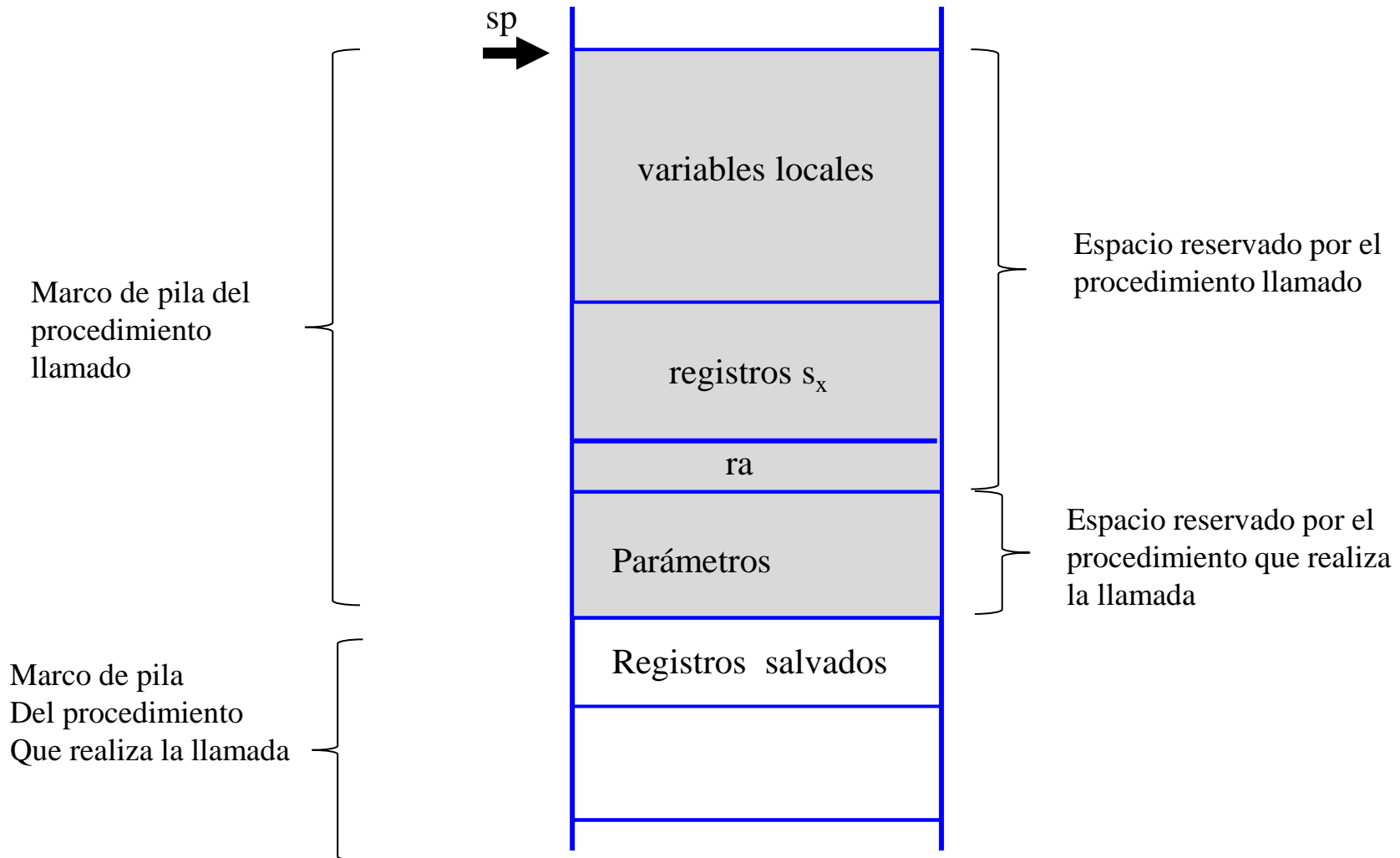
Marco de pila
Del procedimiento
Que realiza la llamada



Construcción del marco de pila subrutina llamada



Construcción del marco de pila



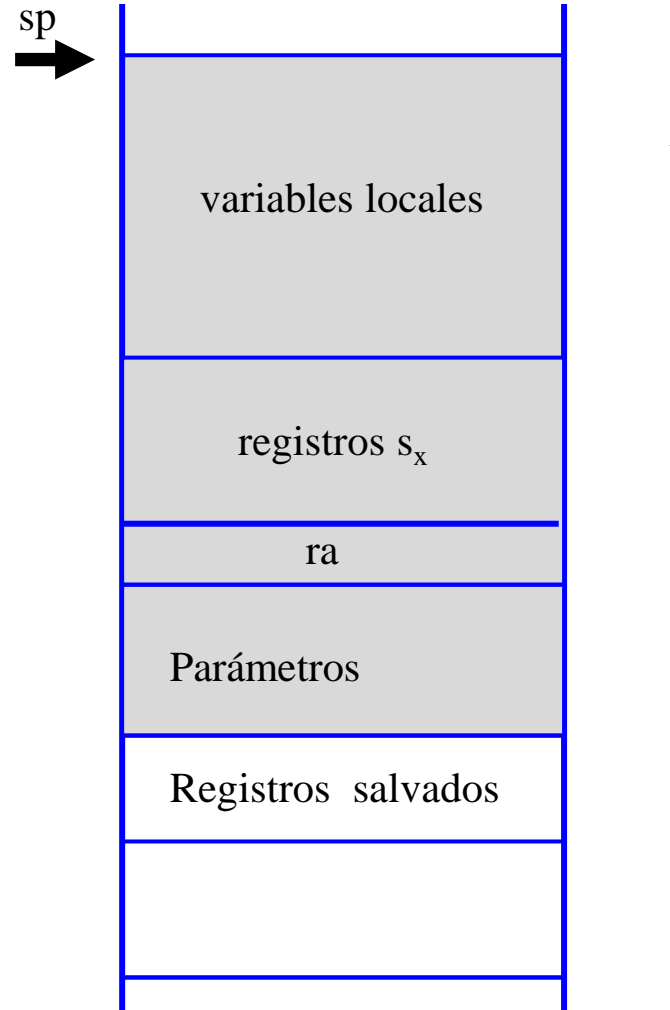
Finalización de la subrutina subrutina llamada

Se devuelven los resultados:

a0, a1, (a1, fa1)

Si devuelve estructuras más
complejas se dejan en la pila
(el llamante habrá dejado
hueco)

Marco de pila
Del procedimiento
Que realiza la llamada

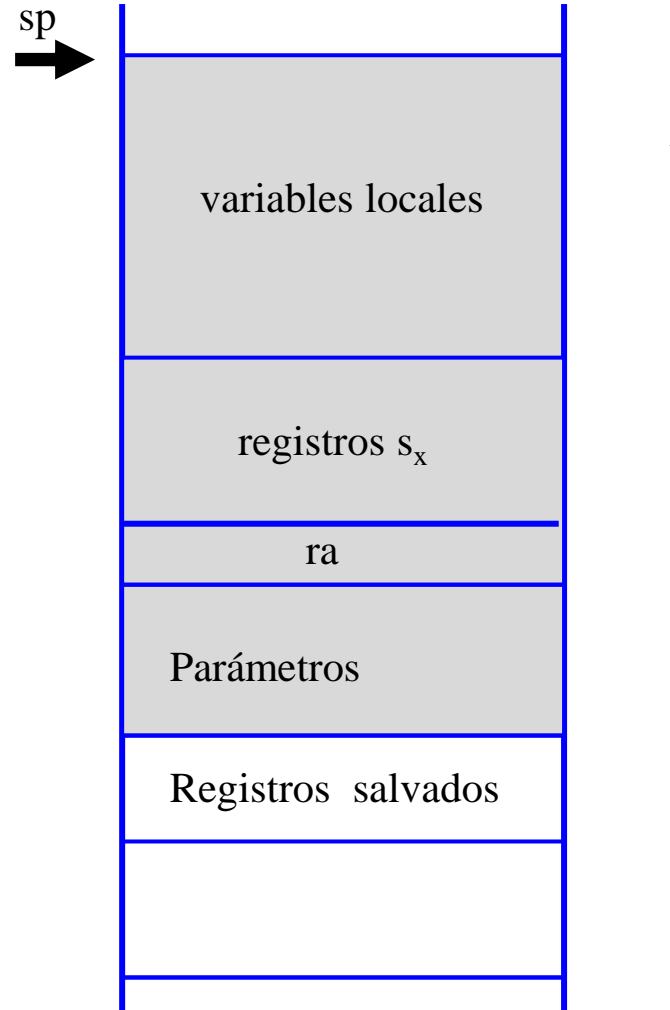


Finalización de la subrutina subrutina llamada

Se restauran los registros salvados:

registros s_x
registro ra

Marco de pila
Del procedimiento
Que realiza la llamada

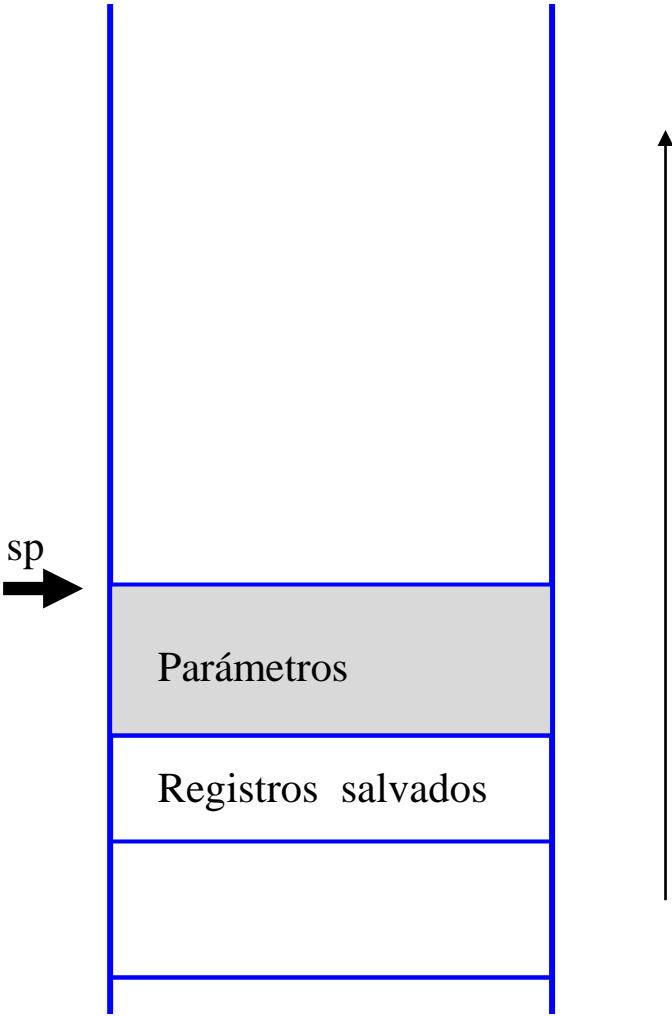


Finalización de la subrutina subrutina llamada

**Se libera el espacio del
marco:**

$sp = sp + \text{tamaño marco}$

Marco de pila
Del procedimiento
Que realiza la llamada



sp

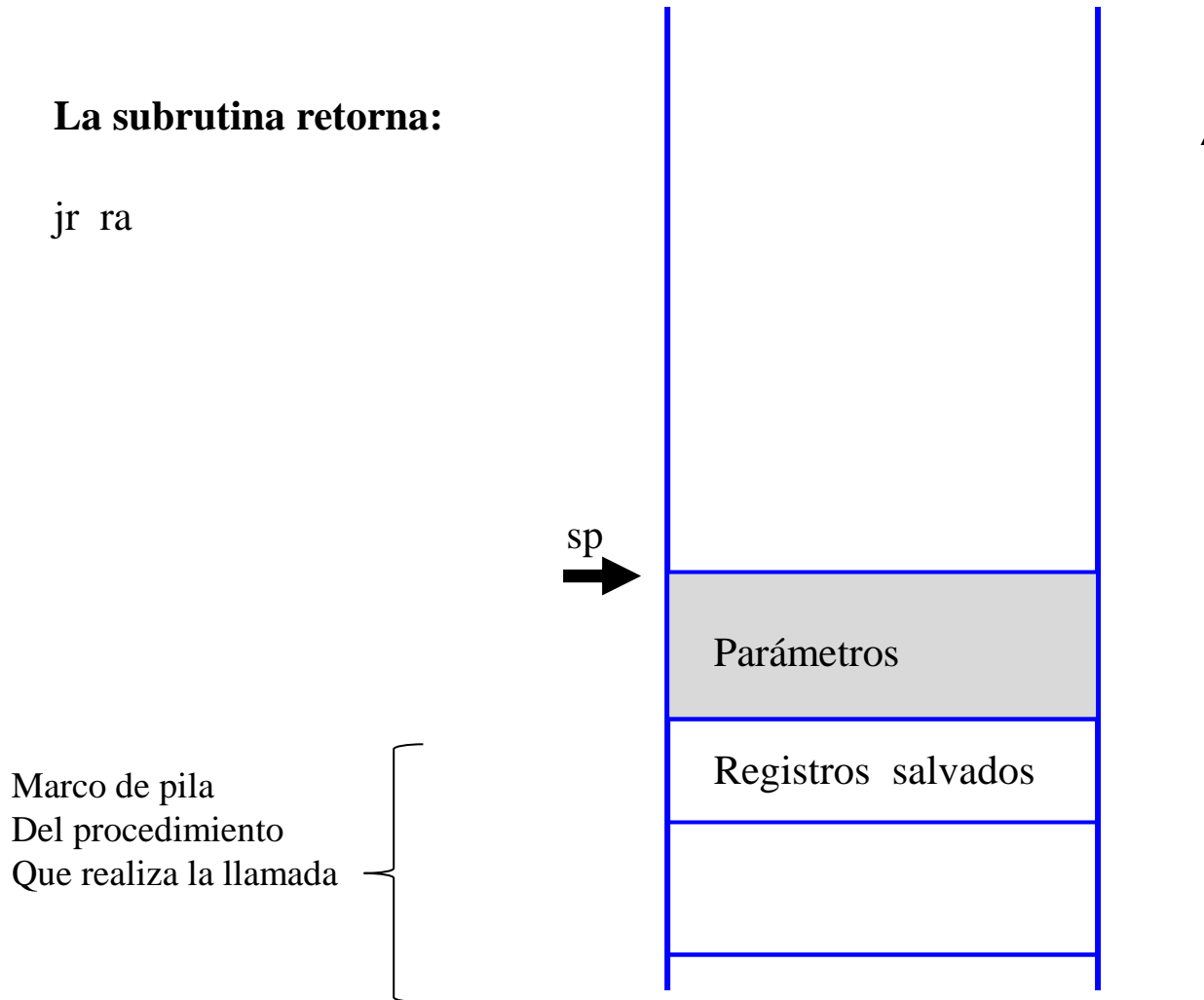
Parámetros

Registros salvados

Finalización de la subrutina subrutina llamada

La subrutina retorna:

jr ra



Finalización de la subrutina subrutina llamante

La rutina que realizó la llamada libera el espacio de los parámetros

$sp = sp + \text{espacio parámetros}$

Marco de pila
Del procedimiento
Que realiza la llamada

sp
→

Parámetros

Registros salvados

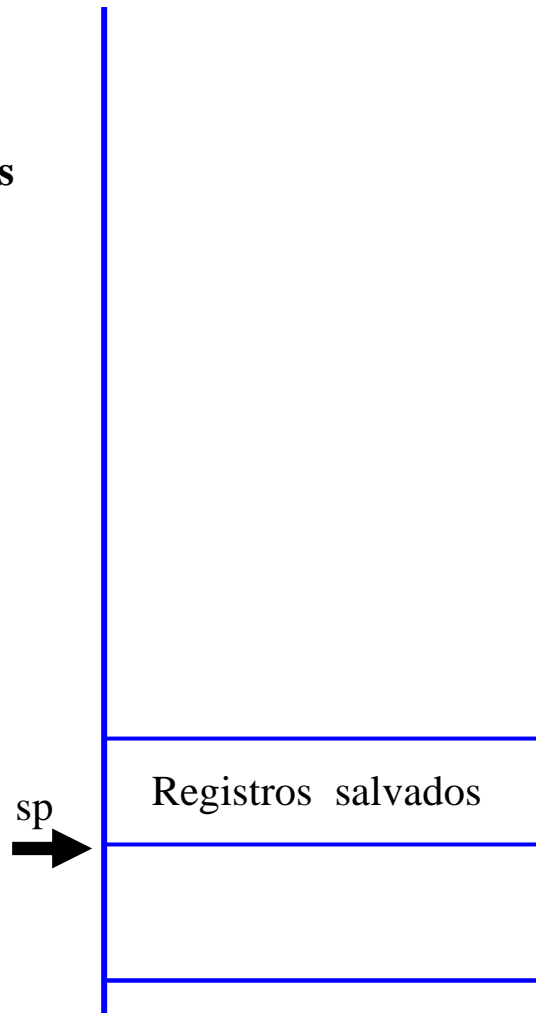


Finalización de la subrutina subrutina llamante

La rutina que realizó la
llamada restaura los registros
que salvó

Restaura sp

Marco de pila
Del procedimiento
Que realiza la llamada



Ejemplo:

```
addi sp sp -8  
sw  t0 0(sp)  
sw  t1 4(sp)
```

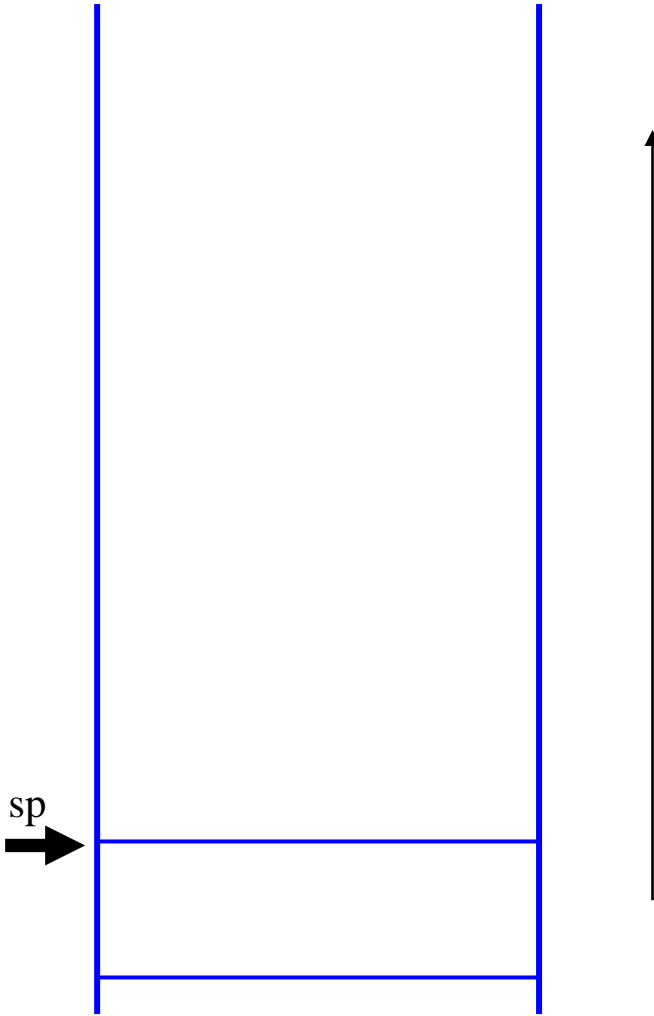
```
li  a0, 5  
jal ra, funcion
```

```
lw  t0 0(sp)  
lw  t1 4(sp)  
add sp sp 8
```

Estado después de finalizar la llamada

Estado inicial

Marco de pila
Del procedimiento
Que realiza la llamada



The diagram illustrates the state of a stack after a procedure call. It features two vertical blue lines representing the stack boundaries. A horizontal blue line near the bottom represents the current stack pointer. To the left of this line, a thick black arrow labeled 'sp' points to the line. To the right, a thin black arrow points upwards, indicating the direction of stack growth. A bracket on the left side groups the text 'Marco de pila', 'Del procedimiento', and 'Que realiza la llamada'.

Variables locales en registros

- ▶ Siempre que se puede, las variables locales (int, double, char, ...) se almacenan en registros
 - ▶ Si no se pueden utilizar registros (no hay suficientes) se usa la pila

```
int f(...)  
{  
    int i, j, k;  
  
    i = 0;  
    j = 1;  
    k = i + j;  
    . . .  
}
```

```
f:    . . .  
      li    t0, 0  
      li    t1, 1  
      add   t2, t0, t1  
      . . .
```

Ejercicio

Considere una función denominada `func` que recibe tres parámetros de tipo entero y devuelve un resultado de tipo entero, y considere el siguiente fragmento del segmento de datos:

```
.data
```

```
    a: .word 5
```

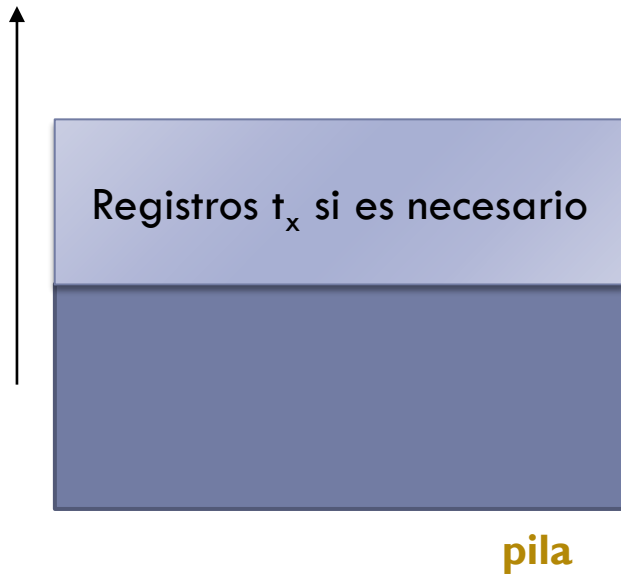
```
    b: .word 7
```

```
    c: .word 9
```

```
.text
```

Indique el código necesario para poder llamar a la función anterior pasando como parámetros los valores de las posiciones de memoria `a`, `b` y `c`. Una vez llamada a la función deberá imprimirse el valor que devuelve la función.

Paso de 2 parámetros



Banco de registros

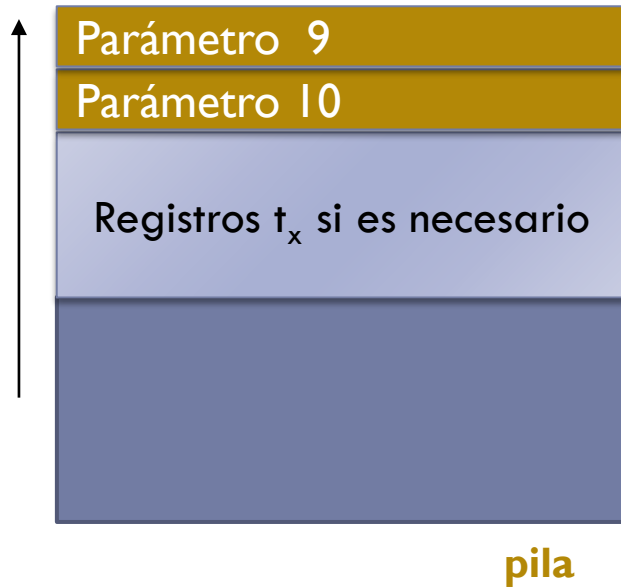
a0	Parámetro 1
a1	Parámetro 2
...	...
a7	Parámetro 8

```
li a0, 5    # param 1
li a1, 8    # param 2

jal ra, func

addi sp, sp, 16
```

Paso de 10 parámetros



Banco de registros

a0	Parámetro 1
a1	Parámetro 2
...	...
a7	Parámetro 8

```
li a0, 5      # param 1
li a1, 8      # param 2
...
li a7, 9      # param 8

addi sp, sp, -8
li t0, 10     # param 10
sw t0, 4(sp)
li t0, 7
s2 t0, 0(sp)  # param 9

jal ra, func

addi sp, sp, 8
```

Asignación dinámica de memoria

- ▶ Llamada al sistema `sbrk()` en RISC-V
 - ▶ `a0`: número de bytes a reservar
 - ▶ `a7 = 9` (código de llamada al sistema)
 - ▶ Devuelve en `v0` la dirección del bloque reservado
 - ▶ En algunos casos para hacer free hay que usar `sbrk` con número negativo

```
int *p;
```

```
p = malloc(20*sizeof(int));
```

```
p[0] = 1;
```

```
p[1] = 4;
```

```
# se reservan 80 bytes
```

```
li a0, 80
```

```
li a7, 9 # código de llamada
```

```
ecall
```

```
mv a0, v0
```

```
li t0, 1
```

```
sw t0, 0(a0)
```

```
li t0, 4
```

```
sw t0, 4(a0)
```

Etapas en la traducción y ejecución de un programa (programa en C)

